

Universidad del Norte.

División de Ingenierías.

Departamento de Ingenierías

Eléctrica y Electrónica.

José Alberto Ledesma León.

# **[GESTIÓN INTELIGENTE DE FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA MEDIANTE UN SISTEMA BASADO EN LÓGICA DIFUSA]**

Manejo eficiente y confiable de energía eléctrica proveniente de fuentes de energía alternativas como son la eólica, la fotovoltaica y la celda de combustible; selección y gestión de los sistemas por medio de inteligencia computacional, específicamente lógica difusa.

**GESTIÓN INTELIGENTE DE FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA MEDIANTE UN  
SISTEMA BASADO EN LÓGICA DIFUSA**

PRESENTADO A LA DIVISIÓN DE INGENIERÍAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
UNIVERSIDAD DEL NORTE



PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA.

POR:

**JOSÉ ALBERTO LEDESMA LEÓN**

INGENIERO ELECTRÓNICO ESPECIALISTA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL DE  
NACIONALIDAD COLOMBIANA

TRABAJO ASESORADO POR:

**CHRISTIAN GIOVANNY QUINTERO MONROY., Ph.D.**

BARRANQUILLA – UNINORTE

2011

Nota de aceptación

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

---

Asesor

## **AGRADECIMIENTOS.**

Agradezco a Dios en primera instancia por darme salud y fortaleza para no desfallecer en el camino hacia la meta propuesta en mis estudios de Maestría, le doy gracias por mi familia, mis padres Luis y Luzmila junto con mis hermanas Lisbeth, Lays y Lidany quienes siempre están atentos y prestos al apoyo en cada plan de mi vida, por mi esposa Eidy y mis hijos José y Luis quienes mantienen mi espíritu alegre y dispuesto.

Agradezco muy especialmente al Ph.D. Christian Quintero por su excelencia docente en el seguimiento, motivación y en fin por toda la colaboración brindada de forma cordial y desinteresada para la realización de esta tesis de maestría, a la Universidad del Norte, el departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica y al Ph.D. Eric Vallejo por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

*A mis hijos José Alejandro y Luis Sebastián que son mi motivación, mi alegría, mi  
inspiración y razón de todo mi esfuerzo. Los amo.*

**Resumen**—Esta investigación propone y evalúa el empleo de técnicas de inteligencia computacional, específicamente lógica difusa, para el desarrollo de un sistema gestor de fuentes de energía alternativas, como son la eólica, la fotovoltaica y la celda de combustible. En este sentido partiendo de un sistema de generación híbrido se verifica su respuesta de disponibilidad, confiabilidad y suministro de energía teniendo en cuenta las condiciones ambientales y la demanda eléctrica, además se comparan diferentes formas de gestión del suministro, observando el comportamiento del sistema en distintos escenarios, a fin de validar, por medio de casos de estudio, que la gestión inteligente de recursos energéticos alternativos alcanza un mayor aprovechamiento de la energía disponible en los mencionados sistemas de generación. En este trabajo se mostrará el diseño de un gestor basado en lógica difusa, capaz de seleccionar, bajo distintos criterios, cuál o cuáles fuentes y en qué proporción, son las más indicadas para cumplir con la demanda eléctrica, para estos fue necesario el implementar los modelos de los sistemas de energía alternativa y una herramienta computacional con interfaz gráfica con la que se verificó y evaluó el comportamiento del sistema.

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. MOTIVACIÓN.....	1
1.2. PROBLEMAS RELACIONADOS CON EL MANEJO DE FUENTES DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.5. PRINCIPALES CONTRIBUCIONES.....	5
1.6. GUÍA PARA LA LECTURA DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	6
<b>MARCO TEÓRICO Y TRABAJOS RELACIONADOS .....</b>	<b>8</b>
2.1. ENERGÍAS ALTERNATIVAS. ....	8
2.1.1. LA CELDA DE COMBUSTIBLE.....	10
2.1.2. LA ENERGÍA EÓLICA.....	13
2.1.3. LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA. ....	19
2.2. LA DEMANDA ELÉCTRICA. ....	21
2.3. INTELIGENCIA COMPUTACIONAL Y LA LÓGICA DIFUSA. ....	23
2.4. TRABAJOS RELACIONADOS.....	26
<b>DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA .....</b>	<b>29</b>
3.1. SELECCIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA. ....	29
3.2. MODELADO DE LA PLANTA DE ENERGÍA ALTERNATIVA. ....	31
3.2.1. SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA (SGE). ....	32
3.2.2. SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO (SGF). ....	34
3.2.3. SISTEMA DE GENERACIÓN POR CELDA DE COMBUSTIBLE (SGC).....	38
3.3. MODELOS DE DEMANDA ELÉCTRICA (DEC).....	41
3.4. SISTEMA DE GESTIÓN BASADO EN LÓGICA DIFUSA (GLD).....	44
3.5. IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA.....	54
3.5.1. OBTENCIÓN DE CURVAS DE DEMANDA ELÉCTRICA. ....	56
3.5.2. POTENCIA NOMINAL DE LA PLANTA DE ENERGÍA ALTERNATIVA. ....	57
3.5.3. GESTIÓN DE LA ENERGÍA GENERADA POR LA PLANTA. ....	59
3.5.4. VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	60
<b>RESULTADOS OBTENIDOS EN LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>64</b>
4.1. EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL GESTOR BASADO EN LÓGICA DIFUSA (GLD).....	64
4.2. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL GESTOR BASADO EN LÓGICA DIFUSA (GLD) ANTE DIFERENTES CURVAS DE DEMANDA Y CAPACIDADES DE LOS SUBSISTEMAS.....	89

**CONCLUSIONES..... 114**

**TRABAJO FUTURO..... 117**

**REFERENCIAS ..... 119**



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama esquemático de una celda de combustible. ....	12
Figura 2.2. Celdas de combustible.....	12
Figura 2.3. Componentes de un generador Eólico. ....	16
Figura 2.4. Clasificación de los aerogeneradores. ....	17
Figura 2.5. Esquema de instalación fotovoltaica.....	21
Figura 2.6. Gráficas de mercados eléctricos.....	22
Figura 2.7. Funciones de pertenencia o membresía. ....	25
Figura 3.2. Diagrama de bloques del sistema eólico. ....	34
Figura 3.3. Curvas de irradiación solar diaria. ....	36
Figura 3.4. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico. ....	37
Figura 3.5. Diagrama de bloques del sistema de celda de combustible. ....	41
Figura 3.6. Demanda eléctrica sector residencial. ....	42
Figura 3.7. Demanda eléctrica sector comercial. ....	43
Figura 3.8. Demanda eléctrica sector industrial.....	43
Figura 3.9. Modelo en bloques del GLD propuesto.....	45
Figura 3.10. Función de membresía de entrada al GLD (VELOCIDAD DE VIENTO). ....	45
Figura 3.11. Función de membresía de entrada al GLD (IRRADIACIÓN SOLAR). ....	46
Figura 3.12. Función de membresía de entrada al GLD (NIVEL DE HIDRÓGENO).....	46
Figura 3.13. Función de membresía de entrada al GLD (DEMANDA). ....	47
Figura 3.14. Superficie de trabajo generada por el GLD para la satisfacción del SGE. ..	48
Figura 3.15. Superficie de trabajo generada por el GLD para la satisfacción del SGF. ..	50
Figura 3.16. Superficie de trabajo generada por el GLD para la satisfacción del SGC. ..	52
Figura 3.17. Función de membresía de las salidas al GLD.....	53
Figura 3.18. Interfaz implementada para la evaluación del GLD. ....	55
Figura 3.19. Panel de control demanda eléctrica.....	57
Figura 3.20. Panel de control sistema eólico.....	58
Figura 3.21. Panel de control sistema fotovoltaico.....	58
Figura 3.22. Panel de control sistema celda de combustible. ....	59
Figura 3.23. Panel de selección de la planta de generación alternativa híbrida.....	61
Figura 3.24. Panel de selección de criterio para el GLD. ....	61
Figura 3.25. Curvas de potencia eléctrica suministrada por cada sistema. ....	62
Figura 3.26. Panel de visualización de curvas de potencia eléctrica suministrada por cada sistema. ....	62
Figura 3.27. Nivel de satisfacción de la demanda eléctrica requerida por la carga (DEC) y porcentaje de operación de cada sistema.....	63

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de las celdas de combustible. ....	13
Tabla 3.1. Clasificación de tipos de viento por velocidad. ....	33
Tabla 4.1. Parámetros de demanda y sistemas alternativos para la evaluación del GLD. .....	65
Tabla 4.2. Casos de experimentos para evaluación del GLD.....	66
Tabla 4.3. Resultados de la evaluación del GLD en escenarios de rentabilidad y confiabilidad. ....	67
Tabla 4.4. Casos de experimentos para la evaluación del GLD en escenario de prioridad preestablecida. ....	68
Tabla 4.5. Resultados de la evaluación del GLD en escenario de prioridad preestablecida. ....	69
Tabla 4.5. Tabla de experimento para diferentes demandas y potencias de los subsistemas. ....	89
Tabla 4.6. Experimento caso 1.....	90
Tabla 4.7. Experimento caso 2.....	91
Tabla 4.8. Experimento caso 3.....	92
Tabla 4.9. Experimento caso 4.....	93
Tabla 4.10. Experimento caso 5. ....	94
Tabla 4.11. Experimento caso 6. ....	95
Tabla 4.12. Experimento caso 7. ....	96
Tabla 4.13. Experimento caso 8. ....	97
Tabla 4.14. Experimento caso 9. ....	98
Tabla 4.15. Experimento caso 10. ....	99
Tabla 4.16. Experimento caso 11. ....	100
Tabla 4.17. Experimento caso 12. ....	101
Tabla 4.18. Resultados caso 1.....	102
Tabla 4.19. Resultados caso 2.....	103
Tabla 4.20. Resultados caso 3.....	104
Tabla 4.21. Resultados caso 4.....	105
Tabla 4.22. Resultados caso 5.....	106
Tabla 4.23. Resultados caso 6.....	107
Tabla 4.24. Resultados caso 7.....	108
Tabla 4.25. Resultados caso 8.....	109
Tabla 4.26. Resultados caso 9.....	110
Tabla 4.27. Resultados caso 10.....	111
Tabla 4.28. Resultados caso 11.....	112
Tabla 4.29. Resultados caso 12.....	113

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>DEC:</b>	Demanda eléctrica requerida por la carga.
<b>ER:</b>	Energía renovable.
<b>SGE:</b>	Sistema de generación eólico.
<b>SGF:</b>	Sistema de generación fotovoltaico.
<b>SGC:</b>	Sistema de generación por celda de combustible.
<b>PEMFC:</b>	Celda de combustible de material polimérico.
<b>AFC:</b>	Celda de combustible alcalinas.
<b>MCFC:</b>	Celda de combustible de carbonato fundido.
<b>SOFC:</b>	Celda de combustible de óxido sólido.
<b>PAFC:</b>	Celda de combustible de ácido fosfórico.
<b>GLD:</b>	Gestor basado en lógica difusa.

---

# 1

## INTRODUCCIÓN

---

### 1.1. MOTIVACIÓN.

La motivación del desarrollo de un sistema de gestión inteligente para el manejo de energía eléctrica proveniente de fuentes alternativas como son la eólica, la fotovoltaica y la celda de combustible, surge con la intención de contribuir al desarrollo y avance de las tecnologías basadas en generación de energía eléctrica limpia, además de buscar una mayor popularización de estas al agregar un componente que contribuya al aumento de la confiabilidad, cumplimiento y rentabilidad de estos tipos de sistemas que dependen, en gran medida, de parámetros tan impredecibles y variables como son por ejemplo la irradiación solar y la velocidad del viento. Según el top ER-INNOVA [1], una de las empresas más importantes dedicadas a la comercialización de energía eléctrica alternativa en Galicia y Portugal, las tecnologías para obtener energía renovable son aún bastante nuevas y el costo de producir energía usándolas es todavía relativamente alto. Sin embargo, el interés de los consumidores y los programas del gobierno están aumentando el uso de energías alternativas, por tal razón, la gestión inteligente de este tipo de fuentes alternativas busca incrementar la eficiencia, en sistemas de este tipo, al momento de cumplir con una demanda eléctrica específica, de tal forma que pueda llegar a ser tan confiable

como son en estos momentos por ejemplo la generación derivada de la quema de combustible fósil y de esta forma poder lograr márgenes relevantes de viabilidad, rentabilidad y confiabilidad.

## **1.2. PROBLEMAS RELACIONADOS CON EL MANEJO DE FUENTES DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.**

En la actualidad existe una gran tendencia hacia el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente. Debido a esto, cada vez se hacen más populares los sistemas de generación de energía eléctrica alternativos, con los cuales se vislumbra el momento en el cual podrá ser posible el utilizar grandes cantidades de energía eléctrica, pero sin el impacto ambiental que acompaña a los sistemas tradicionales de generación [1]. Ahora bien, a pesar de los grandes avances a nivel tecnológico referente a los sistemas alternativos de energía, aún existen ciertos inconvenientes como la **confiabilidad**, la **flexibilidad** y el **cumplimiento** que hacen que este tipo de sistemas se encuentren operando a niveles secundarios o de respaldo [2]. Partiendo de este hecho se podrían minimizar este tipo de inconvenientes pensando en un modelo híbrido que combine técnicas de generación eléctrica limpia como la eólica, la fotovoltaica y la de celda de combustible. Ahora bien, al integrar estos tipos de generación es posible coordinar el funcionamiento de cada uno de los sistemas en busca de ofrecer las mejores condiciones de energía para una carga determinada.

En este momento la implementación de este tipo de tecnología se realiza de acuerdo a predicciones y estadísticas, las cuales cambian en un alto grado dependiendo del lugar donde se precise dicha implementación, prácticamente en muchos casos resultan diseños sobredimensionados para cumplir con la demanda energética presupuestada, sin embargo, en muchas ocasiones no se cumple con la demanda y en otros casos hay picos donde se genera más energía de la necesaria y no es posible aprovecharla [3].

Este trabajo está orientado hacia la observación y estudio de la respuesta de un

sistema de generación de energía eléctrica conformado por una variedad de fuentes alternativas (eólica, fotovoltaica y celda de combustible), el cual busca cumplir con la demanda eléctrica determinada que puede ser de tipo residencial, comercial o industrial, por medio de un sistema de gestión basado en lógica difusa.

Basado en lo descrito anteriormente surge el siguiente interrogante:

¿De qué forma es posible gestionar y coordinar inteligentemente la operación de cada sistema de generación alternativo en aras de alcanzar un manejo confiable, referente al suministro energético y eficiente desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía alternativa disponible?

### **1.3. OBJETIVOS Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.**

Esta investigación tiene como objetivo fundamental el diseño de un gestor inteligente de la potencia generada a partir de fuentes de energía alternativas, dicho gestor estará en capacidad de discernir cuál o cuáles de estos tipos de fuentes entran en operación y en qué porcentaje han de ser utilizadas para cumplir la demanda eléctrica.

Para el diseño del gestor se debe desarrollar en primera instancia el modelado de la planta de generación alternativa híbrida, posteriormente se implementará una herramienta computacional con interfaz gráfica a fin de poder evaluar, probar, modificar y validar los comportamientos del sistema con el gestor diseñado, el cual estará basado en lógica difusa.

De acuerdo a lo anteriormente descrito el objetivo general de la investigación es:

- Desarrollar, evaluar y validar mediante distintos casos de estudio la utilidad de un sistema de gestión inteligente de energía eléctrica, proveniente de fuentes alternativas, basado en lógica difusa.

Y como objetivos específicos de la investigación se tienen:

- Seleccionar y proponer los tipos de fuentes de energía alternativa que harán parte del sistema a gestionar, teniendo en cuenta el estado actual de este tipo de tecnología.
- Determinar las variables del sistema de energía alternativo híbrido propuesto, a fin de obtener la información de entrada más relevante para el sistema de gestión basado en lógica difusa.
- Establecer los requerimientos y criterios de trabajo del sistema de gestión basado en lógica difusa, con el ánimo de identificar prioridades y reglas que este deba cumplir.
- Evaluar el sistema en diferentes casos de estudio para verificar su viabilidad, factibilidad y utilidad.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.**

Debido a la incertidumbre y el carácter estocástico, que intrínsecamente poseen los sistemas alternativos de generación eléctrica, por estar completamente ligados a factores ambientales y a la gran cantidad de variables a las que están sujetos, no es sencillo sostener ritmos de producción como los que si sostienen las termoeléctricas, hidroeléctricas y plantas nucleares, en las cuales la materia prima se encuentra almacenada y es posible disponer de ésta cuando se requiera para cumplir la demanda. Mientras que sistemas como el eólico y el fotovoltaico toman su materia prima de fuentes “no almacenables” como el viento o la radiación solar, que a pesar de ser estimables resulta imposible el predecir su disponibilidad en un tiempo determinado. Debido a esto el diseño de este tipo de sistemas debe realizarse de forma sobredimensionada para de esta manera poder cubrir picos de demanda [3]. Sin embargo, dicha solución, aunque resulte práctica no es la más eficiente ya que existirán momentos en que el sistema podría generar mucha más energía de la necesaria y ésta no sería aprovechada. Adicionalmente, se puede agregar que este tipo de sistemas sobredimensionado ha de resultar, en muchos casos, poco viable económicamente hablando. Por esta razón, es indispensable contar con un sistema

capaz de gestionar de manera inteligente los recursos provenientes de este tipo de fuentes para así poder brindar garantías de operación frente a cambios en la demanda energética y ante la eventual disminución o ausencia de, “combustible” natural, como lo son el viento y la irradiación solar.

### **1.5. PRINCIPALES CONTRIBUCIONES.**

En este trabajo se diseña e implementa un sistema inteligente basado en lógica difusa para la gestión de energía eléctrica, proveniente de fuentes de energías alternativas. Debido a que los sistemas de generación de energía eléctrica basados en fuentes alternativas presentan ciertas limitantes, se busca crear fortalezas realizando un trabajo conjunto entre varios tipos de fuentes, teniendo como eje la gestión inteligente de la energía disponible de cada fuente mediante el sistema de gestión difuso. El estudio presenta la respuesta de este tipo de sistema de energía renovable bajo distintos escenarios de gestión y diferentes condiciones ambientales de operación, con lo cual sería posible determinar bajo qué circunstancias un sistema de este tipo puede llegar a ser rentable, autónomo y confiable. Basado en lo descrito anteriormente este trabajo presenta las siguientes contribuciones en el área de investigación referente a los sistemas de gestión inteligente de fuentes de energía alternativas:

- ✓ Se modela una planta de energía alternativa híbrida con tres tipos de fuentes, además de las clásicas eólicas y fotovoltaicas, se integra la tecnología de las celdas de combustible, buscando con esto un incremento en la confiabilidad de este tipo de sistemas.
- ✓ Se diseña un sistema basado en lógica difusa capaz de gestionar la energía proveniente de la planta de generación alternativa híbrida, de acuerdo a las variables de entrada más relevantes de estos sistemas que además se presentan de forma difusa, como son la velocidad del viento y el nivel de irradiación solar.
- ✓ Se implementa un sistema en interfaz gráfica para la evaluación del sistema



basado en lógica difusa y la planta de energía alternativa, en el que es posible ajustar parámetros de demanda eléctrica, el sistema eólico, el sistema fotovoltaico y el sistema de celda de combustible, con lo cual se pueden desarrollar experimentos en diferentes casos de estudio.

## **1.6. GUÍA PARA LA LECTURA DE ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.**

En el capítulo 1 se presentó la introducción a la investigación desarrollada. En ella se explicaron e indicaron detalles sobre la motivación, objetivos, justificación y las principales contribuciones que se muestran en este trabajo.

En el capítulo 2 se encuentra una revisión de temas necesarios para comprender el funcionamiento de los distintos sistemas de energía alternativas tratados en esta investigación. Se aborda también la temática central de la investigación que es la técnica de inteligencia computacional utilizada para este estudio la cual es Lógica Difusa. Adicionalmente se muestran los trabajos existentes, de otros autores, relacionados con la investigación.

En el capítulo 3 se describe la forma en que se desarrolló el trabajo indicando el modelado de los sistemas de energía renovable y el diseño del sistema de gestión difuso.

En el capítulo 4 se muestran los resultados obtenidos de la evaluación de los modelos realizados, verificando el desempeño del gestor, teniendo en cuenta las distintas variables tales como demanda, tipo de viento, irradiación solar y nivel de hidrógeno entre otras.

Estos resultados son discutidos desde el punto de vista de desempeño de los sistemas, satisfacción de la demanda y empleo eficiente de los recursos.

Basado en los resultados obtenidos, en el capítulo 5 se resumen las conclusiones

obtenidas del desarrollo de la tesis y se culmina con la propuesta de trabajos futuros en esta área en el capítulo 6.

---

# 2

## MARCO TEÓRICO Y TRABAJOS RELACIONADOS

---

En este capítulo se busca ilustrar el entorno que enmarca la investigación mostrando los conceptos relacionados con gestión eléctrica y técnicas de inteligencia computacional, en especial la parte orientada hacia la lógica difusa. Además se abordará la temática relacionada con las fuentes de energía alternativas, realizando un énfasis en las que el tema de investigación propone, que en este caso son la eólica, la fotovoltaica y la celda de combustible. También se hace referencia a trabajos relacionados con las temáticas desarrolladas en la investigación.

### 2.1. ENERGÍAS ALTERNATIVAS.

Según lo descrito por [4] podemos entender por energía alternativa o renovable aquella cuya fuente de obtención se renueva constantemente, poniéndose a nuestra disposición de forma periódica, frente las energías no renovables que no se renuevan o que tienen unos períodos de renovación muy largos.

Todas las fuentes de energía, salvo la geotérmica y la nuclear proceden, en última instancia del sol, sin embargo, lo usual es identificar como energía solar la energía renovable obtenida con el empleo directo de la energía del sol en forma de luz o calor.

La energía que recibe la tierra del sol es enorme, la energía solar recibida por la tierra en un año es muy al consumo total de energía de la humanidad en un año, sin que se registren grandes variaciones en función de la localización geográfica.

La fotosíntesis es la utilización más importante de la energía solar, y la única fuente de materia orgánica, alimentos y biomasa. La leña es una consecuencia de la fotosíntesis, y los combustibles fósiles no son más que energía solar almacenada a lo largo de millones de años.

La energía de las mareas es consecuencia de la acción combinada del sol y la luna, la hidroeléctrica del ciclo del agua, causado en última instancia por el sol, que es quién provee la energía necesaria para evaporar agua del mar y elevarla a las montañas para que pueda ser aprovechada su fuerza al descender. La energía del viento es causada por el sol al calentar desigualmente distintas masas de aire.

El aprovechamiento directo de la energía solar, al tratarse de una forma de energía difusa, variable y poco concentrada, entraña ciertas dificultades, que la tecnología se encarga de solucionar día a día ofreciendo continuamente mejoras. Básicamente hay dos tipos de aprovechamiento de la energía solar directa: la fotovoltaica, que convierte la radiación solar en electricidad, y la térmica, que aprovecha el calor del sol.

Las energías alternativas son, en muchas ocasiones, más económicas que las convencionales. La radiación del sol es gratuita e inagotable, y su uso energético es rentable a medio plazo, permitiendo amortizar en poco tiempo su instalación.

Deducido el coste de amortización, las energías alternativas son totalmente gratuitas, aunque siempre es necesario un sistema de apoyo energético, que comúnmente

resulta ser un sistema de generación distribuida proveniente de termoeléctricas, hidroeléctricas o plantas nucleares, para cuando las condiciones no son favorables.

Actualmente se ha ido incrementando el empleo y la investigación en este tema, por tal razón han surgido nuevas ideas sobre el empleo o transformación de la energía “gratuita”, no solo por cuestiones económicas, si no por el tema ambiental y el impacto desfavorable sobre este que han tenido hasta el día de hoy los sistemas convencionales de generación de energía eléctrica.

### **2.1.1. LA CELDA DE COMBUSTIBLE.**

Según explica [5] “Las celdas de combustible son dispositivos que transforman la energía de una reacción química directamente a energía eléctrica. A diferencia de las baterías, las celdas de combustible no consumen sustancias químicas que forman parte de su estructura o se encuentran almacenadas dentro de ellas; los reactivos son suministrados desde el exterior de la celda, por lo que pueden mantenerse en operación de manera continua. En las celdas de combustible como en las baterías, reacciones silenciosas producen una corriente eléctrica. Una celda de combustible consiste de un acoplamiento de dos electrodos con un electrolito en medio de ellos. El oxígeno que pasa a través de un electrodo e hidrógeno a través del otro, generan electricidad, agua y calor. El hidrógeno que funciona como combustible es alimentado al ánodo de la celda de combustible en donde se oxida. El oxígeno entra a la celda a través del cátodo, en donde se lleva a cabo la reacción de reducción de oxígeno. Los electrodos en la celda de combustible funcionan como interfaces entre el combustible u oxidante y el electrolito, en su superficie se lleva a cabo la catálisis de las reacciones, además de que conducen los electrones generados hacia el sitio de corriente. Comparadas con fuentes de energía convencionales basadas en combustibles fósiles, las celdas de combustible son excepcionalmente limpias y eficientes. Prácticamente su único producto de desecho es agua”.

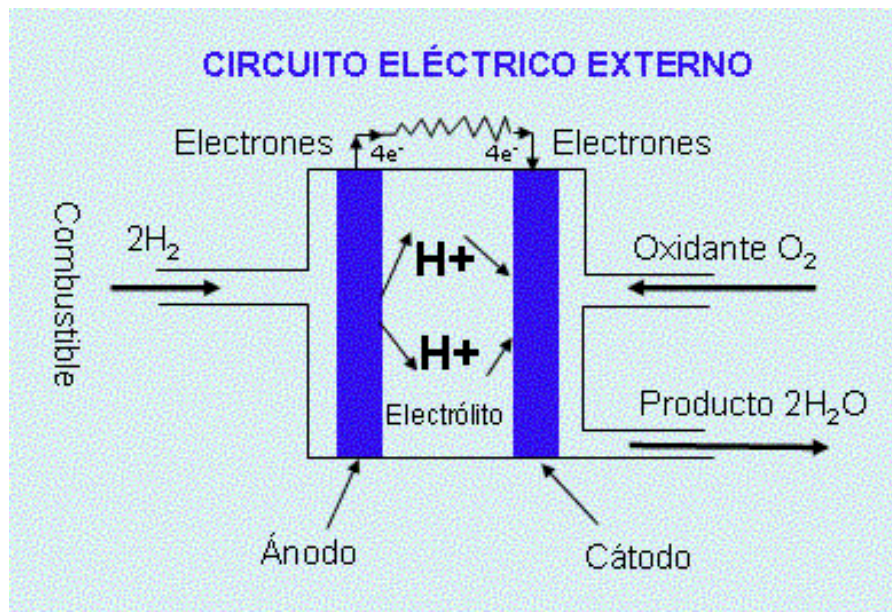
Existen varios tipos de celdas de combustible, dentro de las cuales se pueden clasificar las siguientes de acuerdo al electrolito empleado para el transporte de iones en la

reacción:

- Poliméricas (PEMFC).
- Alcalinas (AFC).
- Carbonato fundido (MCFC).
- Óxido sólido (SOFC).
- Ácido fosfórico (PAFC).

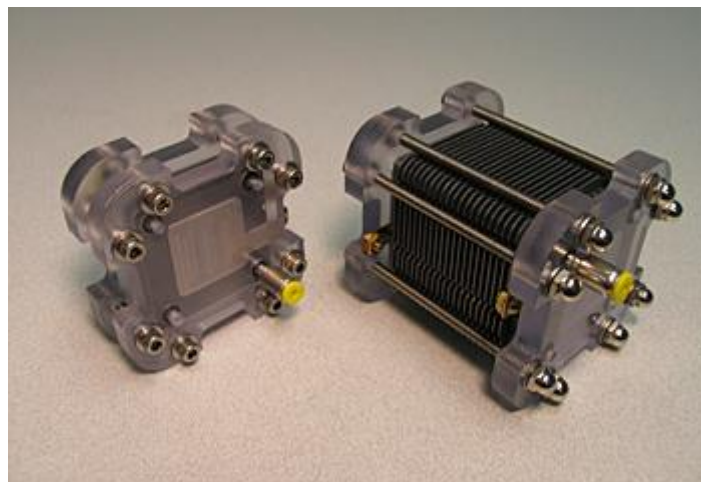
Cada una de las anteriores son utilizadas en diferentes aplicaciones, siendo la SOFC la más utilizada en generación distribuida. Este tipo de tecnología posee varias características que la hacen favorable como los dispositivos de conversión de energía: alta eficiencia (35-60%), baja o nula emisión contaminante, operación silenciosa, y alta confiabilidad debido al limitado número de partes móviles [6].

En la Figura 2.1 tomada de [31] se presenta el esquema de una celda de combustible, como se puede apreciar se inyecta combustible ( $2H_2$ ) al ánodo que es el electrodo que suministra los electrones al circuito externo, el oxidante ( $O_2$ ) es suministrado al cátodo que es el electrodo que los recibe. En una celda de combustible los electrodos separan del electrolito el combustible y el oxidante. Estos electrodos están hechos por lo general de materiales porosos de manera de incrementar la superficie de interacción, superficie esta donde se produce la reacción de separación. Por lo general las celdas de combustible se clasifican según el electrolito que usan. Éste determina el flujo de iones, la temperatura de operación de la celda y otras características particulares del sistema. El electrolito puede ser ácido o alcalino, en el caso de ser ácido este transporta iones positivos de  $H^+$  en caso de ser alcalino los iones transportados son  $OH^-$ . Los electrolitos ácidos son más usados. Existen celdas cuyos electrolitos son no acuosos, estas son particularmente apropiadas para celdas que operan con temperaturas más elevadas [28], el circuito es cerrado por la carga lo que permite el flujo de electrones del ánodo al cátodo, produciendo como material resultante de la reacción agua ( $2H_2O$ ).



**Figura 2.1 Diagrama esquemático de una celda de combustible.**

En la tabla 2.1 se muestra la clasificación de los tipos de celdas de combustible de acuerdo a su empleo y condiciones de operación. La Figura 2.2 tomada de [32] presenta un ejemplo de celdas de combustibles implementadas para el manejo de baja y mediana potencia.



**Figura 2.2. Celdas de combustible.**

<b>Tipo</b>	<b>Electrólito</b>	<b>Temperatura de operación en °C</b>	<b>Características especiales</b>	<b>Aplicaciones</b>
Celda de combustible alcalina (AFC)	Solución de hidróxido de potasio diluido	60 a 120	Alta eficiencia adecuada sólo para el hidrógeno puro y el oxígeno	Sistemas especiales. Sistemas de defensa
Celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM)	Membrana polímero conductora de protones.	20 a 120	Comportamiento de la operación muy flexible, densidad de alta potencia.	Vehículos, generación descentralizada de electricidad (Plantas pequeñas)
Celda de combustible de ácido fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico	160 a 220	Eficiencia limitada. Problemas de corrosión.	Generación de electricidad descentralizada. Potencia y calor combinados.
Celda de combustible de carbonato fundido (MCFC)	Carbonatos diluidos	600 a 650	Control de proceso complejo, problemas de corrosión.	Generación de electricidad centralizada y descentralizada. Potencia y calor combinados.
Celda de combustible de óxido sólido (SOFC)	Bióxido de circonio sólido	850 a 1000	Potencia eléctrica directa del gas natural, tecnología de cerámica (altas temperaturas)	Generación de electricidad centralizada y descentralizada. Potencia y calor combinados.

**Tabla 2.1. Clasificación de las celdas de combustible.**

### **2.1.2. LA ENERGÍA EÓLICA.**

El Sol, al calentar la Tierra, origina el viento, cuya fuerza ha aprovechado el hombre desde la antigüedad. Primero se utilizó para impulsar los barcos en la navegación a vela y, actualmente, se emplea para la producción de electricidad, lo que requiere la presencia de un generador eólico. Para el aprovechamiento de esta energía, hay que tener en cuenta que las principales dificultades surgen de la imposibilidad de obtener un suministro constante y de las variaciones en la velocidad y dirección del viento. Sin embargo, estos problemas se compensan porque se trata de un recurso que no



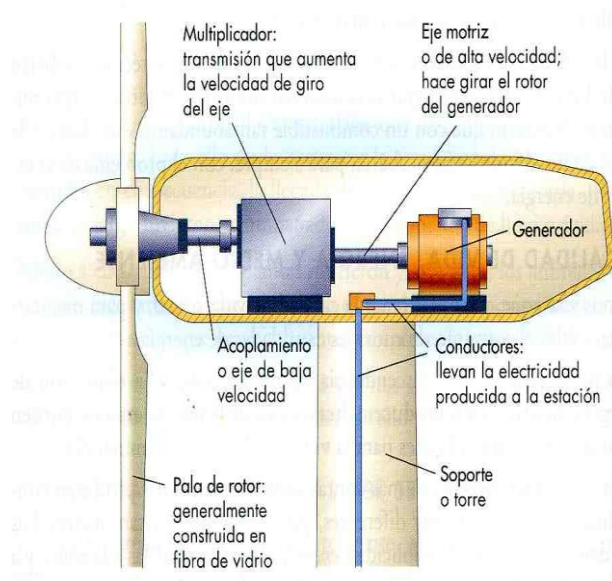
contamina el medio ambiente con gases, ni colabora en aumentar el efecto invernadero. De esta forma, supone una alternativa frente a las fuentes de energía eléctrica que emplean combustible fósil. [7]

Básicamente se puede convertir energía eólica en eléctrica gracias a los aerogeneradores. Estas máquinas eléctricas reciben la energía del viento en sus aspas lo cual produce movimiento sobre un eje que se encuentra acoplado a un sistema mecánico multiplicador, que a su vez transfiere el movimiento a un generador eléctrico. En la actualidad la investigación sobre este tipo de tecnología se encuentra bastante avanzada, cubriendo grandes macro proyectos en los que se pueden encontrar grandes parques eólicos para generar altas cantidades de energía, del orden de los mega Watts. Sin embargo, el hecho de que el viento sea un recurso no controlable, este tipo de centrales solo se emplean de forma integrada junto con la red ya que existirán “huecos” en la generación en los periodos de poco o nada de viento.

En la Figura 2.3 tomada de [33] se puede apreciar la disposición de los elementos que conforman un aerogenerador. De esta figura se puede analizar que el aerogenerador se encuentra compuesto de una góndola que contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. Según describe [29] “El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre de la turbina. A la izquierda de la góndola se tiene el rotor del aerogenerador, es decir las palas y el buje. Las palas del rotor se encargan de capturar el viento y transmitir su potencia hacia el buje. En un aerogenerador moderno de 600 KW cada pala mide alrededor de 20 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión. El buje se encuentra acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador, este eje de baja velocidad conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de 600 KW el rotor gira muy lento, a unas 19 a 30 revoluciones por minuto (rpm) el eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos. El multiplicador permite que el eje de alta velocidad acoplado a su derecha gire unas 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad, el eje de alta velocidad gira aproximadamente a 1500 rpm lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Este eje de alta velocidad está equipado con un freno de disco

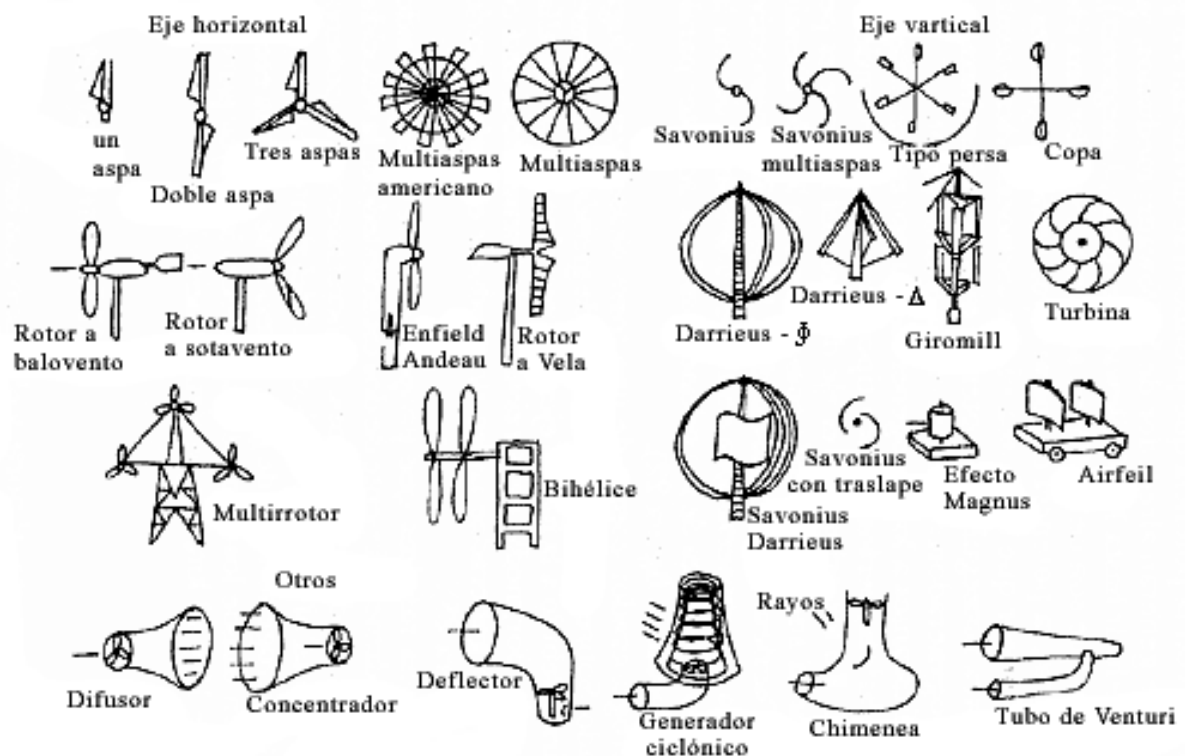
mecánico de emergencia, el freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina. El generador eléctrico suele ser asíncrono o de inducción. En los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 500 y 1500 KW. La unidad de refrigeración contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad refrigerante por aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Por último, la torre que soporta la góndola y el rotor. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del nivel del suelo. Una turbina moderna de 600 KW Tendrá una torre de 40 a 60 metros (la altura de un edificio de 13 a 20 plantas). Las torres pueden ser tubulares o de celosía. Las torres tubulares son más seguras para el personal de mantenimiento de las turbinas ya que pueden usar una escalera interior para acceder a la parte superior de la turbina. La principal ventaja de las torres de celosía es que son más baratas.

En la actualidad existe toda una enorme variedad de modelos de aerogeneradores diferentes entre sí tanto por la potencia proporcionada, como por el número de palas o incluso por la manera de producir energía eléctrica (aisladamente o en conexión directa con la red de distribución convencional). Pueden clasificarse atendiendo a distintos criterios. En la Figura 2.4 tomada de [34] se puede apreciar una gran variedad de estos tipos de aerogeneradores.



**Figura 2.3. Componentes de un generador Eólico.**

Por la posición del aerogenerador, pueden ser de eje vertical o de eje horizontal. Los de eje vertical su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo, son también llamados "VAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "vertical axis wind turbines". Existen tres tipos de estos aerogeneradores, Darrieus, Ponemonas y Sabonius. Los de eje horizontal son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años, en ellos el eje de rotación esta paralelo al suelo, se los denomina también "HAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "horizontal axis wind turbines".



**Figura 2.4. Clasificación de los aerogeneradores.**

Por la posición del equipo con respecto al viento los aerogeneradores pueden clasificarse en los que son a Barlovento en los que las máquinas corriente arriba tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de los diseños corriente arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre. La mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño. Por otro lado, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente. El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre. Además una máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento. Los aerogeneradores a Sotavento en los que las máquinas corriente abajo tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre. La ventaja teórica que tienen es que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente. Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente

fuera del generador. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva. Un aspecto más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que quitarán parte de la carga a la torre. El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba.

Otra forma de clasificar los aerogeneradores es por el número de palas en lo que podemos ver los que son de una sola pala, estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación. Los de dos palas que tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual. Los aerogeneradores de tres palas que son los más usados en las instalaciones modernas en estos el rotor es mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño. Por último los clásicos multipala que poseen un número superior de palas o multipalas. Se trata del llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras en el continente".

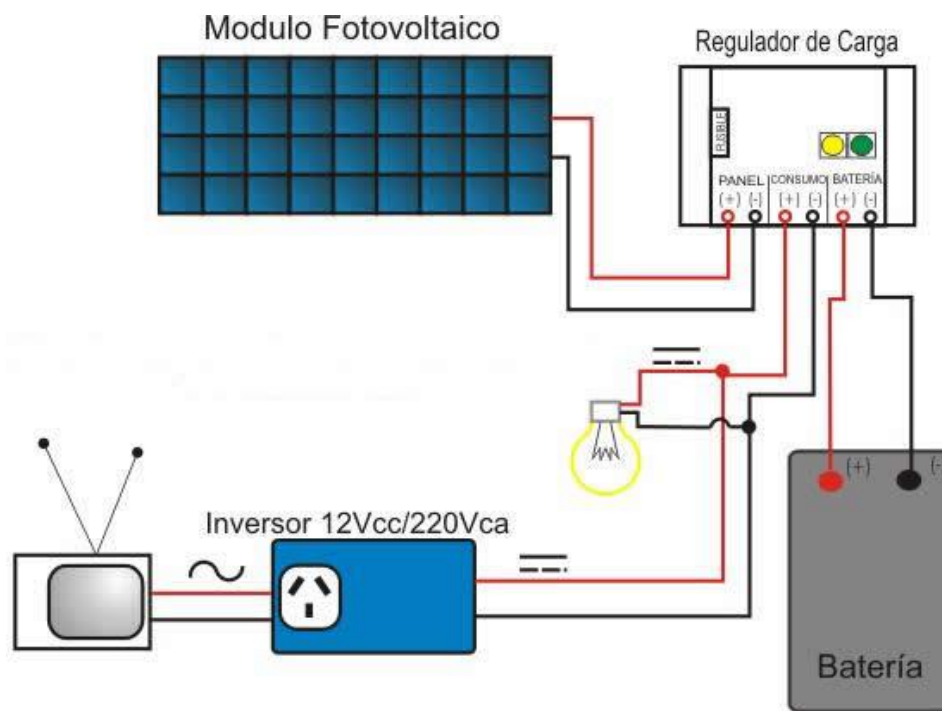
### **2.1.3. LA ENERGÍA FOTOVOLTAICA.**

Se denomina energía solar fotovoltaica a una forma de obtención de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos. Los paneles, módulos o colectores fotovoltaicos están formados por dispositivos semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos. El acoplamiento en serie de varios de estos fotodiodos permite la obtención de voltajes mayores en configuraciones muy sencillas y aptas para alimentar pequeños dispositivos electrónicos. A mayor escala, la corriente eléctrica continua que proporcionan los paneles fotovoltaicos se puede transformar en corriente alterna e inyectar en la red eléctrica, operación que es muy rentable económicamente pero que precisa todavía de subvenciones para una mayor viabilidad. El proceso, simplificado, sería el siguiente, se genera la energía a bajas tensiones (380-800 V) y en corriente continua. Se transforma con un inversor en corriente alterna. Mediante un centro de transformación se eleva a media tensión (15 ó 25 KV) y se inyecta en las redes de transporte de energía. En entornos aislados, donde se requiere poca potencia eléctrica y el acceso a la red es difícil, como estaciones meteorológicas o repetidores de comunicaciones, se emplean las placas fotovoltaicas como alternativa económicamente viable. [8]

La energía fotovoltaica puede aprovecharse de diferentes formas, bien sea tomando la radiación o luz y convirtiendo ésta en energía eléctrica directamente por paneles semiconductores o aprovechando el calor que puede alcanzarse al concentrar por medio de espejos la luz solar, para mover turbinas de vapor, en ambos casos se estaría obteniendo la materia prima de forma “gratuita” aunque como se describió en párrafos anteriores la inversión inicial aún resulta un poco costosa.

Básicamente el esquema de una instalación fotovoltaica común se describe en la Figura 2.5 tomada de [35], en ésta se muestran las etapas de dicha instalación que comprende en primera instancia las celdas solares que son las encargadas de recibir la luz solar y transformarla en energía eléctrica en forma de corriente continua. Según describe [30] “Estas celdas solares pueden ser de tipo cristalina o de tipo amorfa

(silicio sin cristalizar), dentro de las de tipo cristalina se encuentran las mono cristalinas que se componen de secciones de un único cristal de Silicio y las policristalinas formadas por pequeñas partículas cristalizadas. La efectividad de la celda es mayor cuanto mayor son los cristales, pero también su peso, grosor y coste. El rendimiento de las cristalinas puede alcanzar el 20% mientras que el de las amorfas puede no llegar al 10%, sin embargo su coste y peso es muy inferior. Posteriormente, se tiene una etapa llamada acumulador en donde es posible almacenar la carga producida por las celdas solares en su transformación de energía solar a eléctrica, esta etapa ayuda a cubrir el suministro de energía en los periodos de tiempo en que no existe irradiación solar o esta es insuficiente, este acumulador está compuesto por un banco de baterías con conexiones serie y paralelo, generalmente de 12V o 24V con una capacidad en Ah (Amperio-Hora), que determina el tiempo de autonomía que puede tener la instalación en periodos nocturnos o de poca irradiación solar, un regulador de carga es el encargado de controlar el flujo de las celdas hacia el banco de baterías, esto con la finalidad de evitar sobrecargas en el banco de baterías y mantener su vida útil, el banco de baterías puede estar constituido por baterías de baja auto descarga como son las de Ni-Cd, también pueden ser empleadas baterías de Pb-Ácido que resultan ser las más utilizadas y por último es posible emplear baterías comunes como las empleadas en los arranques de automóviles con el inconveniente de poseer un alto coeficiente de auto descarga. Como última etapa de la instalación fotovoltaica se tiene un inversor de corriente, dado que en última instancia la energía solicitada por una red eléctrica convencional es de tipo alterna, en este caso es posible emplear inversores senoidales puros que trabajen en un régimen óptimo (se recomienda) u otros tipos de convertidores como por ejemplo triangulares o cuadrados que suelen producir mayores pérdidas y trabajo ineficiente”.



**Figura 2.5. Esquema de instalación fotovoltaica.**

## **2.2. LA DEMANDA ELÉCTRICA.**

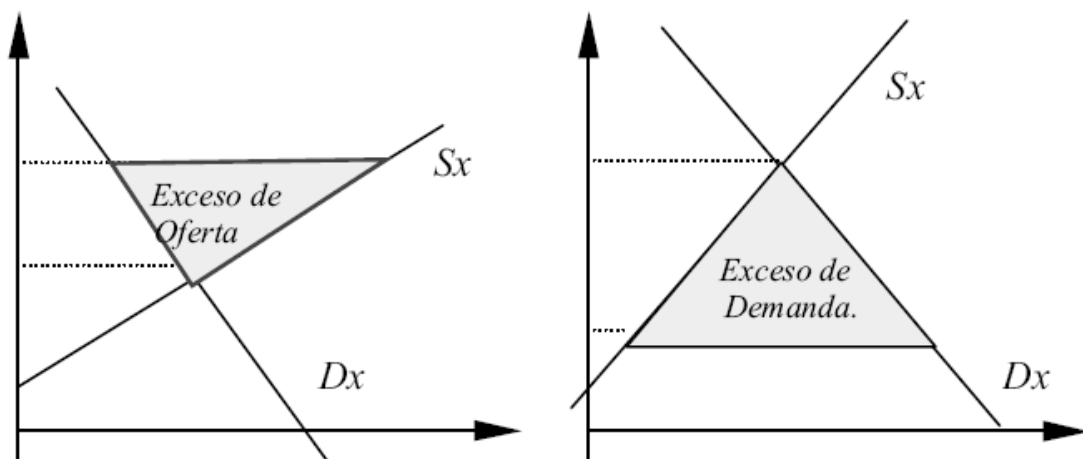
De acuerdo con lo que describe [9] “Desde un punto de vista técnico suele hablarse de la energía eléctrica como una “fuente de energía secundaria”, dado que la misma se obtiene a partir de otras fuentes denominadas primarias, básicamente: carbón, gas y petróleo (combustibles fósiles), hidráulica y nuclear. Al margen de éstas y otras consideraciones puramente técnicas, desde un punto de vista económico debemos de reseñar dos importantes características que nos ayudarán a comprender el funcionamiento del mercado eléctrico.

- Con independencia de la fuente primaria utilizada, la energía eléctrica no puede ser almacenada.
- En la mayor parte de sus usos la electricidad juega el papel de entrada específico, es decir, el de un factor productivo que no puede ser reemplazado en el corto plazo. (Relación Técnica de Sustitución = 0, funciones de producción tipo Leontieff). Pensemos que si bien la mayor parte de los instrumentos eléctricos



podrían ser adaptados para funcionar con otras fuentes de energía (gasóleo, gas, etc), en el corto plazo estas modificaciones no serían factibles.

En la Figura 2.6 se muestra la comparación entre lo que en un mercado convencional sería un exceso de oferta y otra en el que existe un exceso de demanda. El área sombreada se correspondería con el valor de los stocks acumulados. Sin embargo, en el mercado eléctrico, al ser la electricidad un bien no acumulable, el exceso de oferta, es decir la electricidad producida y no consumida inmediatamente, se perdería sin más, en esta situación el área sombreada representaría las pérdidas asociadas a una asignación ineficiente de las fuentes primarias, que constituyen recursos escasos y limitados. Por otra parte, en la situación de exceso de demanda en un mercado tradicional, el área sombreada representaría el valor de la demanda no atendida. Dada esta situación los demandantes tendrían la posibilidad de esperar a que se atendiera su petición (se formarían colas), o alternatively podrían consumir algún sustituto cercano del bien demandado. Sin embargo en el mercado eléctrico no existe la posibilidad de recurrir a sustitutivos cercanos, al menos en el corto plazo. Respecto a la primera alternativa, (formación de colas), un retraso en el suministro eléctrico podría tener gravísimas consecuencias económicas y sociales, en esta situación el área sombreada representaría un coste de eficiencia asociado a la situación de exceso de demanda”.



**Figura 2.6. Gráficas de mercados eléctricos.**

En resumen la demanda eléctrica es la energía o potencia eléctrica requerida, por un conjunto de elementos o dispositivos eléctricos, conectados a una fuente de suministro de potencia eléctrica, para realizar un trabajo determinado. Esta demanda viene determinada en watts y es relativa o dependiente de los tipos de cargas conectadas, por tal razón es variable conforme la hora del día, el día de la semana, el mes del año y el sector urbano al que se esté alimentando.

### **2.3. INTELIGENCIA COMPUTACIONAL Y LA LÓGICA DIFUSA.**

Básicamente, la Inteligencia Computacional no es un cuerpo homogéneo de conceptos y técnicas. Más bien es una mezcla de distintos métodos que de una forma u otra cooperan desde sus fundamentos. En este sentido, el principal objetivo de la Inteligencia Computacional es aprovechar la tolerancia que conllevan la imprecisión y la incertidumbre, para conseguir manejabilidad, robustez y soluciones de bajo costo. Los principales ingredientes de Inteligencia Computacional son la Lógica Difusa, la Neuro-computación y el Razonamiento Probabilístico, incluyendo este último a los Algoritmos Genéticos, las Redes de Creencia, los Sistemas Caóticos y algunas partes de la Teoría de Aprendizaje. En esa asociación de Lógica Difusa, Neurocomputación y Razonamiento Probabilístico, la Lógica Difusa se ocupa principalmente de la imprecisión y el razonamiento aproximado; la Neurocomputación del aprendizaje, y el Razonamiento Probabilístico de la incertidumbre y la propagación de las creencias [10].

#### **Lógica difusa, teoría de los conjuntos difusos.**

Los Conjuntos Clásicos (nítidos en la terminología de lógica difusa) surgen de forma natural por la necesidad del ser humano de clasificar objetos y conceptos. Este tipo de conjuntos pueden definirse bien sea por un listado de elementos o por una función de pertenencia, De este modo, para definir un conjunto nítido  $A$  podemos utilizar la función de pertenencia dada por la ecuación (2.3.1).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (2.3.1)$$

Es decir, una función de tipo escalón centrada en el valor o valores de umbral o umbrales de decisión.

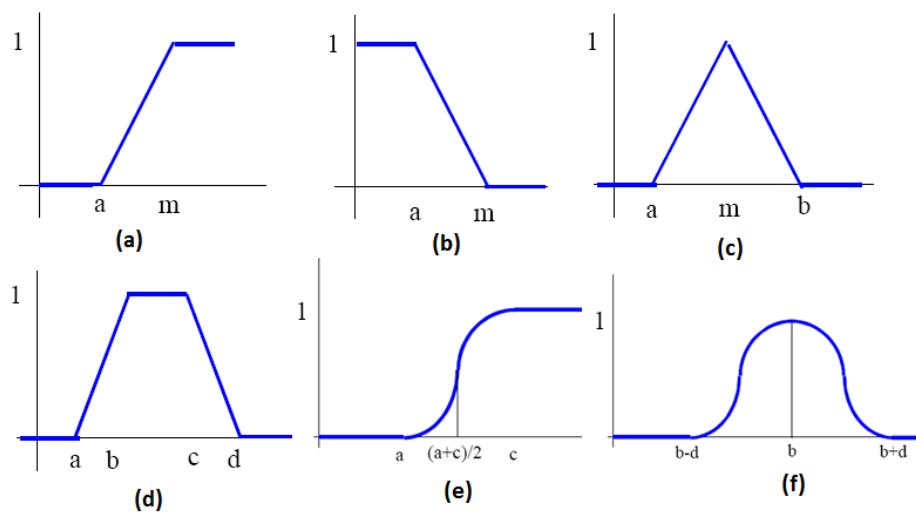
Por otro lado, en los conjuntos difusos se relaja la restricción de que la función de pertenencia valga 0 ó 1, y se deja que tome valores en el intervalo [0,1]. La necesidad de trabajar con conjuntos difusos surge del hecho que hay conceptos que no tienen límites claros y que en nuestro saber humano tienen un carácter subjetivo que se fundamenta en la percepción como por ejemplo la estatura de una persona, la temperatura de un recinto y en el caso de este trabajo serían la velocidad del viento, la irradiación solar o el nivel de combustible.

Para comprender el espíritu de la lógica difusa es necesario entender que se llama **descriptor** o **variable lingüística** a la noción o concepto que se va a cualificar de forma difusa, que el **universo de discurso** es el rango de valores que pueden tomar los elementos que poseen la propiedad expresada por la variable lingüística, el **valor lingüístico** son las diferentes clasificaciones que efectuamos sobre la variable lingüística y el **conjunto difuso** es el valor lingüístico junto a una función de pertenencia. El valor lingüístico es el “nombre” del conjunto, y la función de pertenencia se define como aquella aplicación que asocia a cada elemento del universo de discurso el grado con que pertenece al conjunto difuso. Los conjuntos difusos y las funciones de pertenencia pueden emplearse de dos formas posibles:

- ✓ Para estimar grados de pertenencia a un conjunto.
- ✓ Para expresar posibilidades en una situación en la que se dispone de información incompleta.

De este modo se puede apreciar que la principal diferencia entre la teoría de conjuntos clásica y la difusa es que mientras que los valores de la función de pertenencia de un conjunto nítido son siempre 0 o 1, la función de pertenencia de un conjunto difuso

toma valores en todo el intervalo  $[0,1]$ . De este modo se ve que, al contrario de los conjuntos nítidos, que pueden definirse de varias formas, los conjuntos difusos vienen siempre definidos por su función de pertenencia la figura 2.7, Muestra las funciones de membresía más utilizadas en estos sistemas. La Figura 2.7a muestra la función Gamma, la Figura 2.7b presenta la función Gamma menos uno, la Figura 2.7c muestra la forma de la función triangular, la Figura 2.7d es una función de la forma trapezoidal y las Figuras 2.7e y 2.7f son ejemplo de funciones Sigmoides.



**Figura 2.7. Funciones de pertenencia o membresía.**

Ahora bien, en la técnica de lógica existen dos modelos, el Mamdani y el Sugeno, en el Mamdani se toman los valores de las variables y son convertidas a variables difusas (fuzzificación) para luego pasar a un motor de inferencia donde se determinan las salidas difusas mediante reglas de inferencia “si entonces”, estas salidas son posteriormente convertidas en un valor (desfuzzificación); en el modelo Sugeno se tiene la misma etapa de entrada y su diferencia radica en que las reglas no vienen determinada por etiquetas lingüísticas si no por funciones de entrada que tiene el sistema por tal motivo los resultados que provienen de las reglas son valores específicos que no necesitan ser convertidos a un valor determinado, puesto que esta función ya ha sido realizada o se realiza al evaluar las funciones. En este trabajo se empleó el modelo Mamdani debido a que las variables con las que se trabajó no podían ser descritas por una función clara y precisa como sugiere el modelo Sugeno.

Adicionalmente, el modelo Mamdani permite emplear funciones de pertenencia más sencillas, claras y con un grado de complejidad menor al momento de elaborar funciones y reglas.

Cabe destacar, que de todas las técnicas de inteligencia computacional existentes la lógica difusa es de las que mejor se amolda al tipo de sistema que se propone en este trabajo. Esto se debe a la naturaleza difusa de las variables que se manejan, en las cuales es complicado determinar con exactitud cuál debe ser la respuesta del sistema ante los valores tomados por las variables. Por tal razón se tomó la técnica de lógica difusa como la más idónea para implementar un sistema gestor de energía proveniente de fuentes alternativas.

#### **2.4. TRABAJOS RELACIONADOS.**

La idea de la utilización de plantas de generación eléctrica ecológicas, es una tendencia que no es nueva, pero en cierta forma ha tomado mayor fuerza en estos tiempos debido a los problemas medio ambientales que sufre el planeta en la actualidad, en lo referente a esto han surgido numerosas invenciones y prototipos en pro de alcanzar un mayor rendimiento de este tipo de sistemas de generación, de ahí surge la evolución hacia los sistemas híbridos en los que no sólo se ha de depender de un solo tipo de fuente si no de dos o más de éstas, contribuyendo con esto a ganar en cuanto a confiabilidad. Sin embargo, el punto principal que nos atañe en este trabajo es el de dar una perspectiva de cómo son o cómo podrían ser manejados este tipo de sistemas híbridos, razón por la cual el principal objetivo es el identificar las formas que en la actualidad se emplean para el direccionamiento del flujo de energía hacia una carga conectada a un sistema de este tipo. Más aún, es imprescindible el poder hallar relación de estos sistemas con técnicas de inteligencia computacional.

Partiendo de esta premisa podemos localizar el trabajo de diseño de controlador difuso para sistema eólico [11] en el cual por medio de unas de las técnicas de

inteligencia computacional como lo es la lógica difusa se busca el controlar la carga de las baterías en un sistema híbrido eólico y fotovoltaico. Otro de los proyectos observados, que tienen relación con los objetivos de este trabajo, es el sistema CYCLOPS de la empresa española ECOTECNIA [12] el cual es un sistema híbrido autónomo en donde la parte de gestión es realizada con estrategias de control clásico. En otro de los proyectos consultados, resalta el elaborado por la asociación de Google y General Electric en busca de desarrollo en lo denominado “smart grids” [13] que consiste en redes eléctricas inteligentes en las que se busca que el gestor de red opere como se maneja actualmente el sistema de Internet y en lo cual todos los que se encuentran conectados a la red pueden suministrar y recibir energía de ésta. Como otra referencia se tiene el aplicativo diseñado por HOMER ENERGY [20] del cual es posible consultar cuales serían los parámetros de diseño de una planta de energía alternativa de una gran variedad de fuentes de este tipo e indicando costos y porcentajes de emisión de contaminantes entre otras opciones. De las referencias anteriores lo más relevante a destacar es el hecho que actualmente se está trabajando en la incorporación de inteligencia computacional a sistemas de energía alternativa y que esto contribuirá al manejo eficiente de la energía captada por sistemas de este tipo, lo cual mostrará un panorama atractivo para la inversión. En otro de los trabajos consultados se puede apreciar el control de flujo de energía proveniente de fuentes alternativas como las descritas para el presente trabajo, en esta referencia [21] se emplea un controlador difuso para maximizar los recursos provenientes de la fuente eólica y fotovoltaica, direccionando la energía que en un momento resulte como excedente hacia un electrolizador para la producción de hidrógeno que puede ser empleado en una celda de combustible. El trabajo realizado por [22] presenta un sistema híbrido para generación distribuida de energía eléctrica basado en varias fuentes de distintos tipos haciendo énfasis en aquellas en que la materia prima es de tipo renovable. El estudio realizado por [23] muestra que la gestión de sistemas de energía mejora la eficiencia del proceso de generación, además de servir de apoyo para la recopilación de información sobre el empleo de estos sistemas, también es posible identificar cuáles serían las combinaciones óptimas entre los sistemas de generación con los que se logra un incremento del rendimiento de estos al trabajar de forma conjunta. En el proyecto mostrado en [24] se implementó el modelado de un

sistema híbrido que emplea biogás, biomasa y energía solar para el soporte energético de una estación base, para este caso la gestión realizada se encarga simplemente de tomar la energía generada en exceso por cada sistema y almacenarla en un banco de baterías. En la referencia [25] se muestra un escenario de gestión de energía eléctrica basado en lógica difusa para la supervisión de la energía en un vehículo eléctrico. En este sistema se gestiona la energía que proviene de un generador acoplado a la tracción del vehículo, un banco de ultra capacitores y un banco de baterías. En el artículo presentado por [26] se presenta un gestor de red basado en lógica difusa que debe supervisar el suministro de red convencional junto con un generador eólico, un sistema descentralizado y un sistema de almacenamiento de energía. En la referencia [27] se propone un sistema de gestión de la energía proveniente de un generador eólico acoplado a un sistema de celda de combustible para su posterior conexión a una red de generación descentralizada.

El presente trabajo tiene como similitud con los anteriormente citados, el hecho de manejar energía proveniente de fuentes alternativas empleando técnicas de inteligencia computacional. Sin embargo, su diferencia radica en que en este caso se gestionan los tres tipos de fuentes a partir de su recurso (viento, irradiación, hidrógeno) y de acuerdo a la demanda estimada, lo que lo hace más sensible a los cambios que se presenten. Adicionalmente este trabajo presenta diferentes tipos de gestión, con lo cual es posible dar una mayor flexibilidad al sistema. Teniendo como fundamento las referencias descritas en este segmento, en la presente investigación se propone un sistema de gestión de energía proveniente de fuentes alternativas, basado en lógica difusa en el que se profundizará en el capítulo 3 de este trabajo.

---

# 3

## DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DE LA PROPUESTA

---

En el presente trabajo se plantea el diseño e implementación de un gestor difuso para una planta de energía alternativa que consta de tres fuentes de generación, una eólica, una fotovoltaica y una con celda de combustible, en este sentido con las tres fuentes trabajando de forma paralela se busca ganar confiabilidad en cuanto al cumplimiento de la demanda energética. De igual forma, a través de la gestión del sistema basado en lógica difusa, se logre un incremento en la eficiencia del sistema, ya que por medio de éste será posible el empleo, en mayor porcentaje, de las fuentes menos costosas como lo son la eólica y la fotovoltaica, dejando la intervención de la celda de combustible solo para casos en los que la demanda no pueda ser suplida por las fuentes mencionadas anteriormente.

### **3.1. SELECCIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVA.**

Para la selección de las fuentes de energía alternativas a utilizar en la evaluación del sistema de gestión basado en lógica difusa, se tomó en consideración el desarrollo,



costo y futuro de la tecnología en este tipo de campo, muy trabajado en los últimos años como es el de la energía renovable.

Como fue mencionado en el Capítulo 2, la energía eólica es una de las tecnologías de mayor acogida en Europa, debido a su simplicidad, eficiencia y rapidez de retorno de la inversión, la cual la convierte en una de las fuentes de energía renovable de mayor competitividad, frente a las fuentes de generación por quema de combustible [7].

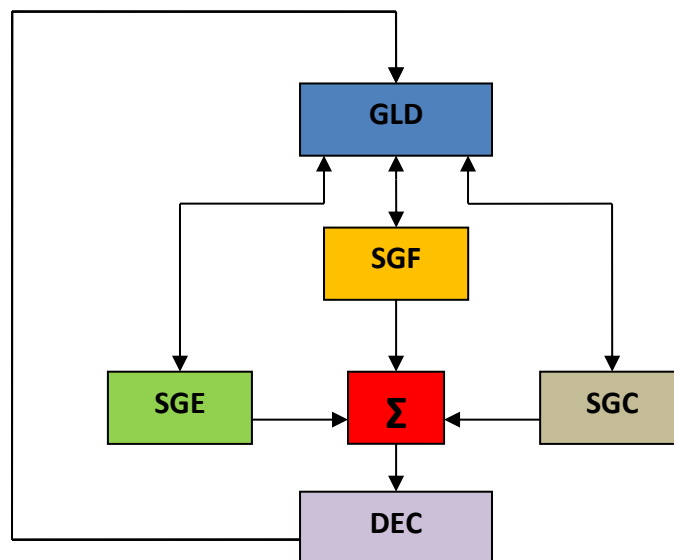
La generación de energía por medio del viento fue seleccionada en este trabajo debido a que tiene un gran avance tecnológico y en cuanto a costos, su implementación resulta, en la mayoría de los casos, viable. La energía solar fotovoltaica si bien en su inversión inicial es una de las de más alto costo [8], también es cierto que en la actualidad es otra de las tecnologías hacia la cual se dirigen grandes esfuerzos científicos y económicos en aras de su mejoramiento y posicionamiento, dado además que en muchos lugares existen estudios del comportamiento de la irradiación, es posible predecir cuál sería el comportamiento de una instalación de este tipo de una forma bastante acertada. Por último, la energía proveniente del hidrógeno que es aprovechada en las celdas de combustible, a pesar de no ser una tecnología totalmente novedosa, en los últimos años ha tenido gran auge, sobre todo en el sector automotriz, debido a que es una tecnología relativamente sencilla y en la cual es posible el control de la potencia generada ya que es función del flujo de hidrógeno en el sistema, esto hace que sea una de las tecnologías de mayor popularidad en los últimos años [5, 6].

En este trabajo de investigación se propone trabajar con los modelos genéricos de un aerogenerador eólico de eje vertical que son los más comúnmente usados en los parques eólicos, paneles solares de celdas mono cristalinas de uso común en medianas y grandes instalaciones fotovoltaicas y celdas de combustibles de óxido de silicio (SOFC) por ser éstas últimas las empleadas para generación distribuida. La propuesta de este trabajo es la interacción de un grupo de fuentes de energías alternativas de las cuales se puedan obtener los beneficios de sus cualidades individuales, en una sinergia para disminuir los problemas que cada una presentaría operando de forma individual,

de ahí que podemos afirmar que el sistema logra integrar la robustez y manejo de altas potencias de un sistema eólico, la capacidad de almacenamiento y autonomía de un sistema fotovoltaico y la confiabilidad y continuidad de un sistema de celda de combustible.

### 3.2. MODELADO DE LA PLANTA DE ENERGÍA ALTERNATIVA.

En la Figura 3.1. Se muestra el diagrama de bloques de la planta de energía alternativa de la cual se desea gestionar la energía que aportan sus subsistemas, eólico, fotovoltaico y de celda de combustible.



**Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema propuesto.**

Las flechas indican el tipo de comunicación que hay entre los sistemas, de esta forma se entiende que el sistema de gestión basado en lógica difusa (GLD) recibe información de los sistemas de generación eólico (SGE), fotovoltaico (SGF) y de celda de combustible (SGC), a la vez que envía a estos la información porcentual de su requerimiento es decir que existe una comunicación bidireccional. El sistema de gestión solo tiene comunicación unidireccional con la carga, de la cual solicita

información referente a la demanda eléctrica. Una vez la gestión es realizada la energía gestionada de cada sistema es concentrada, de ahí el sumador, en busca de cumplir la demanda eléctrica requerida por la carga (DEC).

### 3.2.1. SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA (SGE).

El SGE está compuesto básicamente por el modelo de Aerogenerador, las ecuaciones descritas en esta sección fueron tomadas de [14], este modelo contiene la cantidad de aerogeneradores, el largo de pala de las hélices, las velocidades de corte alta y baja, el coeficiente de potencia, la eficiencia del generador y la eficiencia del multiplicador, todo lo anterior determinará una potencia nominal del sistema. Sin embargo, la energía disponible del sistema dependerá de la velocidad del viento que incide sobre las palas de los aerogeneradores, el cual será modelado teniendo en cuenta los tipos de vientos tales como los mostrados en la tabla 3.1 [3].

La energía presente en el viento es posible expresarla mediante la ecuación (3.1), en la cual se muestra la potencia ideal que podría ser capturada del viento.

$$P = \frac{\rho A V^3}{2} \quad (3.1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire que circula por un área A con una velocidad V.

Aquí no toda esa energía puede ser captada por el aerogenerador, por lo cual se define un factor llamado el coeficiente de potencia  $C_p$ , que se observa en la ecuación (3.2).

$$P = \frac{C_p \rho A V^3}{2} \quad (3.2)$$

Aún así esta energía no es totalmente captada por el generador debido a una serie de pérdidas que se dan en el proceso de transformación de energía y que están ligados a componentes mecánicos y eléctricos, por lo cual ha de tenerse en cuenta el rendimiento del multiplicador mecánico  $\eta_{mec}$  y el rendimiento del generador eléctrico  $\eta_{elec}$ , esto se implementa en el modelo con la ecuación (3.3).

$$P = \frac{C_p \eta_{mec} \eta_{elec} \rho A V^3}{2} \quad (3.3)$$

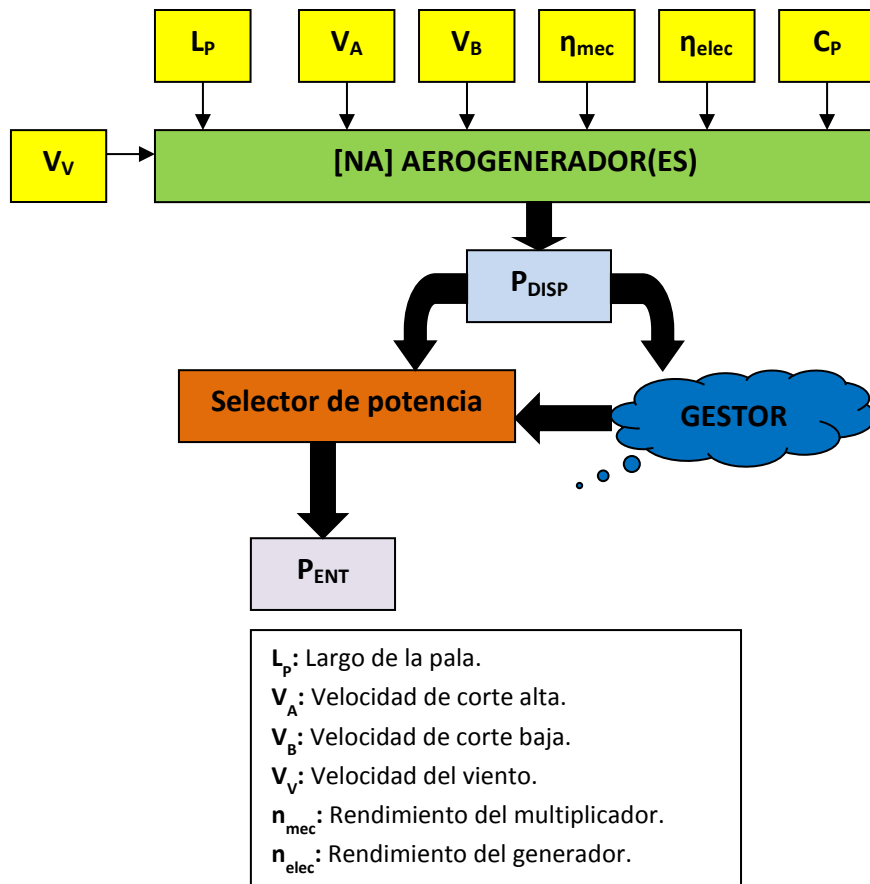
La ecuación (3.3) entrega como respuesta la potencia disponible del sistema eólico y estará controlada por las velocidades de corte alta y baja, valores sobre los cuales el sistema eólico saldrá de funcionamiento, bien sea por debajo de la velocidad de corte baja o por encima de la velocidad de corte alta.

Para el modelado de los vientos incidentes sobre el sistema eólico se tomaron los estándares de vientos suministrados por el servicio meteorológico del aeropuerto internacional Ernesto Cortizos de Barranquilla Colombia estos se encuentran descritos en la tabla 3.1.

TIPO	VELOCIDAD KM / H	VELOCIDAD NUDOS
Brisa	1 – 5	0.5 – 2.7
Suave	6 – 11	3.2 – 5.9
Leves	12 – 19	6.5 – 10.3
Moderados	20 – 28	10.8 – 15.1
Regulares	29 – 38	15.7 – 20.5
Fuertes	39 – 49	21.1 – 26.5
Ventarrón	50 – 61	27.0 – 33.0
Temporal	62 – 74	33.5 – 40.0

**Tabla 3.1. Clasificación de tipos de viento por velocidad.**

La estructura del modelo del sistema eólico se puede observar en la Figura 3.2. En esta se muestran las entradas y salidas del sistema eólico.



**Figura 3.2. Diagrama de bloques del sistema eólico.**

### 3.2.2. SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO (SGF).

El SGF está compuesto básicamente por el modelo de Panel Solar, junto con el banco de baterías, las ecuaciones descritas en esta sección fueron tomadas de [15, 16] este modelo contiene el número de paneles y su potencia; la capacidad del acumulador, su voltaje y las pérdidas inherentes a éste; también se tienen en cuenta las pérdidas del conversor y de auto descarga entre otras. Todo lo anterior determina la potencia nominal del sistema. Sin embargo, la energía disponible del sistema depende de la irradiación solar que incide sobre los paneles y de la potencia acumulada en el banco de baterías.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, para el modelado del sistema fotovoltaico se parte de un rendimiento global del sistema determinado por la ecuación 3.4.

$$R = (1 - K_b - K_c - K_v) * 1 - \frac{K_d N}{P_d} \quad (3.4)$$

Donde  $K_b$  representa las pérdidas en el sistema debido al banco de baterías, las cuales pueden diferir entre sistemas expuestos a descargas profundas o intensas y los que no;  $K_c$  representa las pérdidas en el sistema debidas al convertidor de potencia de DC – AC, las cuales dependen de si éste es un convertidor senoidal puro en régimen óptimo o no;  $K_v$  refleja las pérdidas por factores varios tales como el efecto Joule, sulfatación y elementos parásitos;  $K_d$  representa las pérdidas en el banco de baterías por causa de la auto descarga inherente a éstas, lo cual depende del tipo de baterías empleadas;  $N$  es el tiempo de autonomía del banco de baterías y  $P_d$  es el coeficiente de profundidad de descarga diaria del banco de baterías, el cual no debe exceder el 80% de la capacidad nominal del banco de baterías. El tiempo de autonomía del sistema fotovoltaico  $N$  viene determinado por la ecuación (3.5).

$$N = \frac{CVP_d}{E} \quad (3.5)$$

En esta ecuación se aprecia el factor  $C$  que es la capacidad del banco de baterías en Ah,  $V$  es la tensión nominal del acumulador y  $E$  es la potencia eléctrica producida por los paneles.

Para calcular la energía disponible del sistema fotovoltaico, se tiene en cuenta que para que exista una energía aprovechable, que es la que se encuentra disponible en el sistema, debe producirse una cantidad de energía suficiente para compensar las pérdidas, esto se ve en la relación de la ecuación (3.6).

$$E_T = ER \quad (3.6)$$

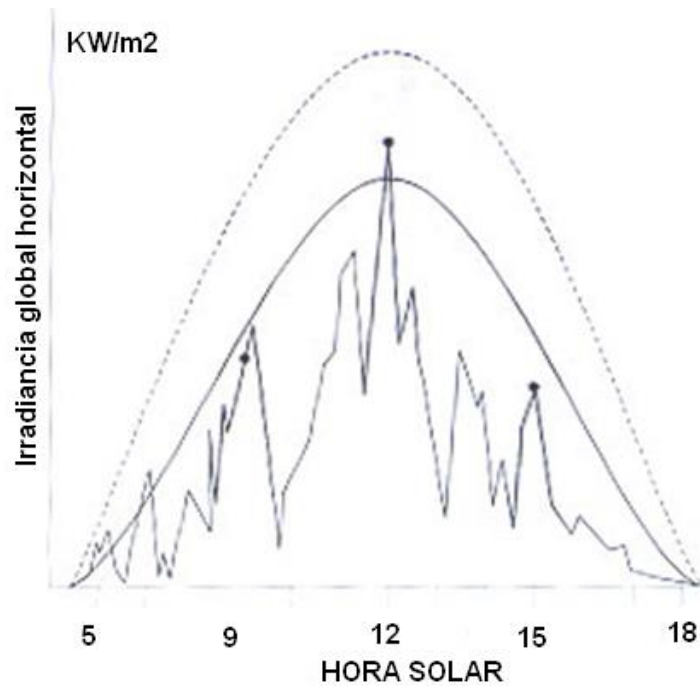
Donde  $E_T$  es la energía aprovechable del sistema y  $E$  la energía generada en teoría o descartando las pérdidas. Esta energía que se genera teóricamente viene descrita por la ecuación (3.7).

$$E = 0.9N_p W_p H_{ps} \quad (3.7)$$

En esta ecuación se tiene un factor constante junto con  $N_p$  que representa el número de paneles solares en el sistema,  $W_p$  es la potencia nominal de cada panel solar en el sistema y  $H_{ps}$  son las horas de pico solar donde se encuentra situada la instalación fotovoltaica, este último parámetro se encuentra relacionado con la irradiación solar, qué es una de las variables de entrada para el modelo, de acuerdo con la ecuación 3.8.

$$H_{ps} = I.H \quad (3.8)$$

Donde  $I$  es la irradiación solar dada en  $\text{KW/m}^2$  y  $H$  es el tiempo en horas. La irradiación será modelada teniendo en cuenta los tipos de estados del tiempo tales como soleado, nublado y lluvioso. En este modelamiento se empleó como ayuda el aplicativo solar irradiation data [17] la curva de irradiación solar se muestra en la Figura 3.3.



**Figura 3.3. Curvas de irradiación solar diaria.**

En la Figura 3.3 tomada [36], se aprecia un día solar que en las latitudes de Suramérica va desde las 6 de la mañana hasta las 6 de la noche, la línea de trazos oscilantes marca la irradiación en  $\text{KW/m}^2$  medida en instantes determinados de tiempo, la curva

punteada muestra la estimación de la irradiación extraterrestre y la curva continua la estimación de la irradiación en la superficie terrestre [18].

La estructura del modelo del sistema fotovoltaico se puede observar en la Figura 3.4. En esta se muestran las entradas y salidas del sistema eólico.

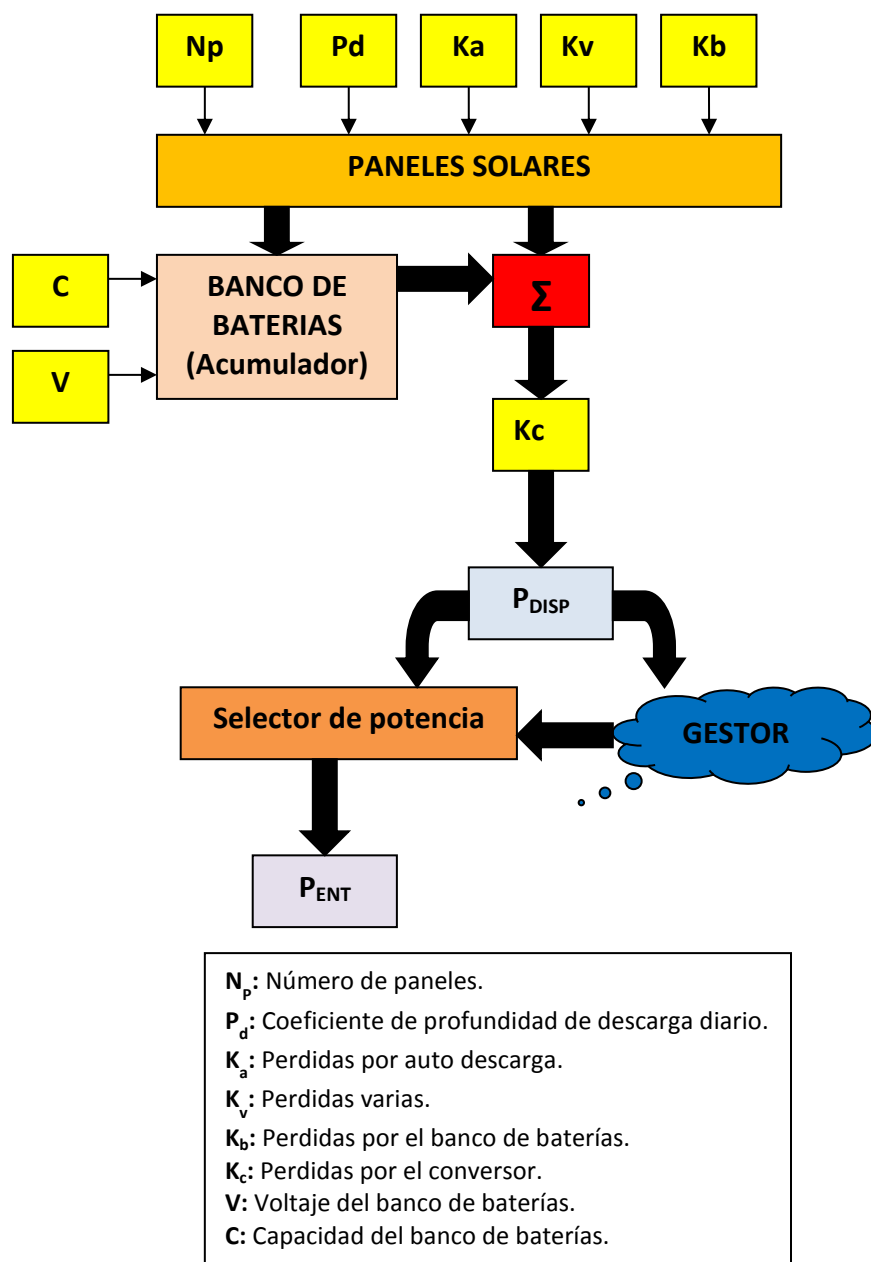


Figura 3.4. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico.



### 3.2.3. SISTEMA DE GENERACIÓN POR CELDA DE COMBUSTIBLE (SGC).

El SGC está compuesto básicamente por el modelo de Celda de Combustible SOFC empleadas en sistemas distribuidos, las ecuaciones descritas en esta sección fueron tomadas de [19] este modelo contiene el número de celdas de combustible junto con sus características intrínsecas tales como el factor de utilización, las pérdidas por activación, óhmicas y por concentración que junto con el flujo de hidrógeno determinarán la potencia nominal del sistema, la cual podrá estar disponible siempre y cuando el sistema esté activo.

Para el modelado de la celda de combustible de óxido de silicio en primera instancia se debe tener en cuenta la reacción química que se desarrolla en la celda, en la cual no todo el hidrógeno que ingresa a la celda reacciona con el oxígeno. Para ello, se determina un coeficiente llamado  $U_f$  factor de utilización, el cual viene relacionado en la ecuación (3.9).

$$U_f = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{Entrada}} \quad (3.9)$$

Donde el numerador corresponde al flujo de hidrógeno que reacciona y el denominador al flujo total de hidrógeno que ingresa a la celda. Para conocer cuánto hidrógeno reacciona se emplea la ecuación (3.10).

$$q_{H_2}^r = \frac{N_0}{2F} \quad (3.10)$$

Donde  $N_0$  es la cantidad de celdas en serie que conforman el total de la pila de combustible y  $F$  es la constante de Faraday (96487C/mol). Para el cálculo de la potencia que entrega el sistema de la celda de combustible, es necesario conocer la tensión DC de la celda gracias al empleo de la ecuación de Nernst que viene descrita en la ecuación (3.11).

$$E = E_0 + \frac{R_u T_K}{2F} \left[ \ln \frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] \quad (3.11)$$

Donde  $E$  es la FEM generada en el sistema de la celda,  $E_0$  es el potencial ideal,  $R_u$  es la constante del gas universal (8314 J/ (kmol·°K)),  $T_K$  es la temperatura absoluta en grados Kelvin (1273°K),  $p_{H_2}$  es la presión parcial del hidrógeno,  $p_{O_2}$  es la presión parcial del oxígeno y  $p_{H_2O}$  es la presión parcial del vapor de agua. El cálculo de las presiones parciales viene dado por las ecuaciones 3.13, 3.14, 3.15.

$$\frac{dp_{H_2}}{dt} = \frac{1}{T_{H_2}} \left[ p_{H_2} + \frac{1}{K_{H_2}} \left[ q_{H_2}^{Entrada} - 2K_r I_{fc}^r \right] \right] \quad (3.13)$$

$$\frac{dp_{H_2O}}{dt} = \frac{1}{T_{H_2O}} \left[ -p_{H_2O} + \frac{2K_r I_{fc}^r}{K_{H_2O}} \right] \quad (3.14)$$

$$\frac{dp_{O_2}}{dt} = \frac{1}{T_{O_2}} \left[ -p_{O_2} + \frac{1}{K_{O_2}} \left[ \frac{q_{H_2}^{Entrada}}{r_{H-O}} - 2K_r I_{fc}^r \right] \right] \quad (3.15)$$

Donde  $T_{H_2}$ ,  $T_{H_2O}$  y  $T_{O_2}$ , son las constantes de tiempo para el flujo de hidrógeno, agua y oxígeno respectivamente;  $K_{H_2}$ ,  $K_{H_2O}$ ,  $K_{O_2}$ , son las constantes molares de las válvulas que controlan el flujo de hidrógeno, agua y oxígeno respectivamente;  $r_{H-O}$  es la relación de hidrógeno y oxígeno en la reacción.  $K_r$  es una constante de reacción determinada por la ecuación (3.16) e  $I_{fc}^r$  es la intensidad que recorre la celda de combustible, la cual viene definida por la ecuación (3.17).

$$K_r = \frac{N_0}{4F} \quad (3.16)$$

$$I_{fc}^r = \frac{U_{opt} q_{H_2}^{Entrada}}{2K_r} \quad (3.17)$$

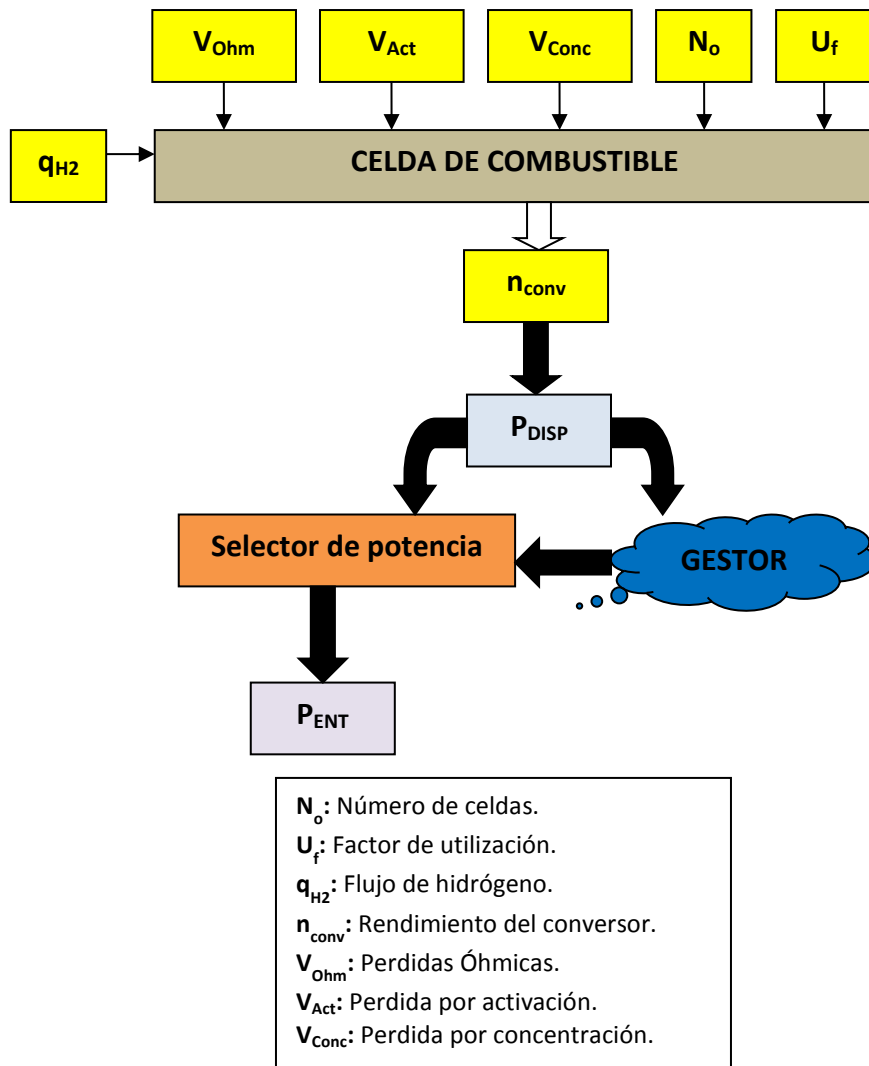
En la que  $U_{opt}$  es la constante de utilización de combustible óptima. Dado que en la celda de combustible ocurren pérdidas, estas han de tenerse en cuenta como lo describe la ecuación 3.18.

$$V_{FC} = E - V_{Ohm} - V_{Act} - V_{Conc} \quad (3.18)$$

Donde  $V_{FC}$  es la tensión de salida de la celda de combustible,  $V_{Ohm}$  es la caída de tensión debido a la resistencia eléctrica interna de la celda de combustible,  $V_{Act}$  es la caída de tensión en la celda de combustible debida a su umbral de activación y  $V_{Conc}$  es la caída de tensión en la celda de combustible debida a la concentración de hidrógeno. Obteniendo lo anterior es posible conocer la potencia generada por el sistema de la celda de combustible según la ecuación (3.19).

$$P_{FC} = 2.F.V_{FC}.q_{H_2}^r n_{Conv} \quad (3.19)$$

Donde  $P_{FC}$  es la potencia generada en el sistema de la celda de combustible y  $n_{Conv}$  es el factor de eficiencia de la conversión DC-AC debido a que el sistema genera potencia DC. Para la investigación realizada se consideró la potencia disponible de la SOFC como una variable que se encuentra controlada y que depende del flujo de hidrógeno, que en este caso ha de mantenerse constante. La estructura del modelo del sistema fotovoltaico se puede observar en la Figura 3.5. En esta se muestran las entradas y salidas del sistema de celda de combustible.

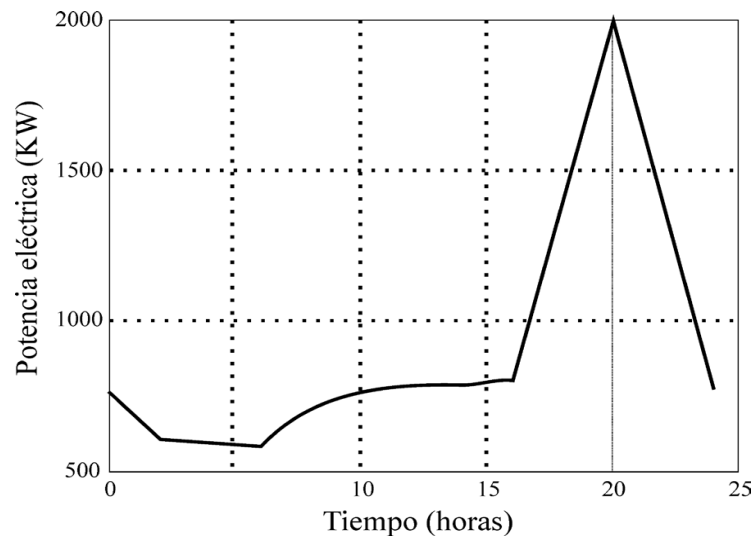


**Figura 3.5. Diagrama de bloques del sistema de celda de combustible.**

### **3.3. MODELOS DE DEMANDA ELÉCTRICA (DEC).**

Para el modelado de la DEC se utiliza la experiencia acumulada del comportamiento de la demanda eléctrica en los tres sectores conocidos tradicionalmente que son el residencial, el comercial y el industrial. Este modelo de la DEC es elaborado con registros históricos obtenidos de [9] donde se estudia la demanda eléctrica en España y se caracterizan estos tipos de demandas.

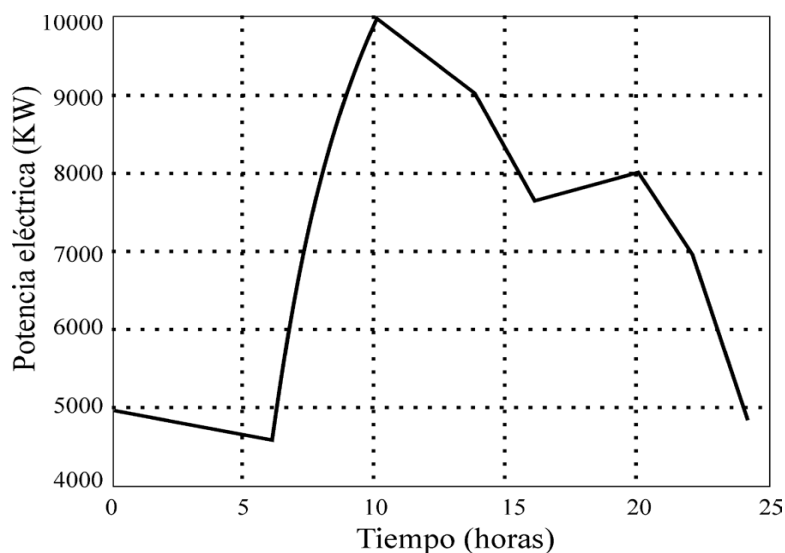
En la Figura 3.6 se ilustra a manera de ejemplo el consumo eléctrico ponderado del sector residencial, en él se observan los picos de demanda en horario familiar comprendido entre las 7: PM y 9: PM.



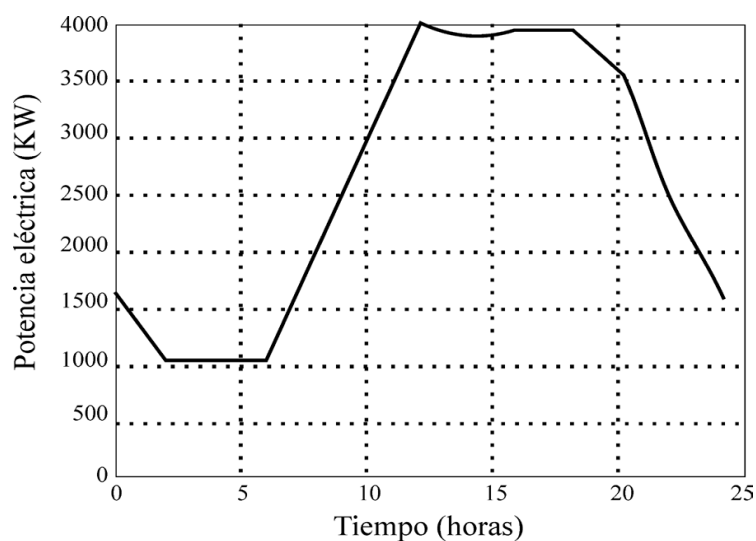
**Figura 3.6. Demanda eléctrica sector residencial.**

En la Figura 3.7 se muestra un ejemplo del consumo o demanda energética solicitada por el sector de tipo comercial, en él se muestra un consumo mayor en el periodo laboral u horario de oficina, aproximadamente de 8:AM a 8:PM.

En la Figura 3.8 se observa un ejemplo de la curva de demanda modelada para el sector industrial, en esta se puede ver un mayor periodo de tiempo de trabajo con alto consumo energético, dado que los procesos industriales en su mayoría resultan ser continuos y con un alto gasto.



**Figura 3.7. Demanda eléctrica sector comercial.**

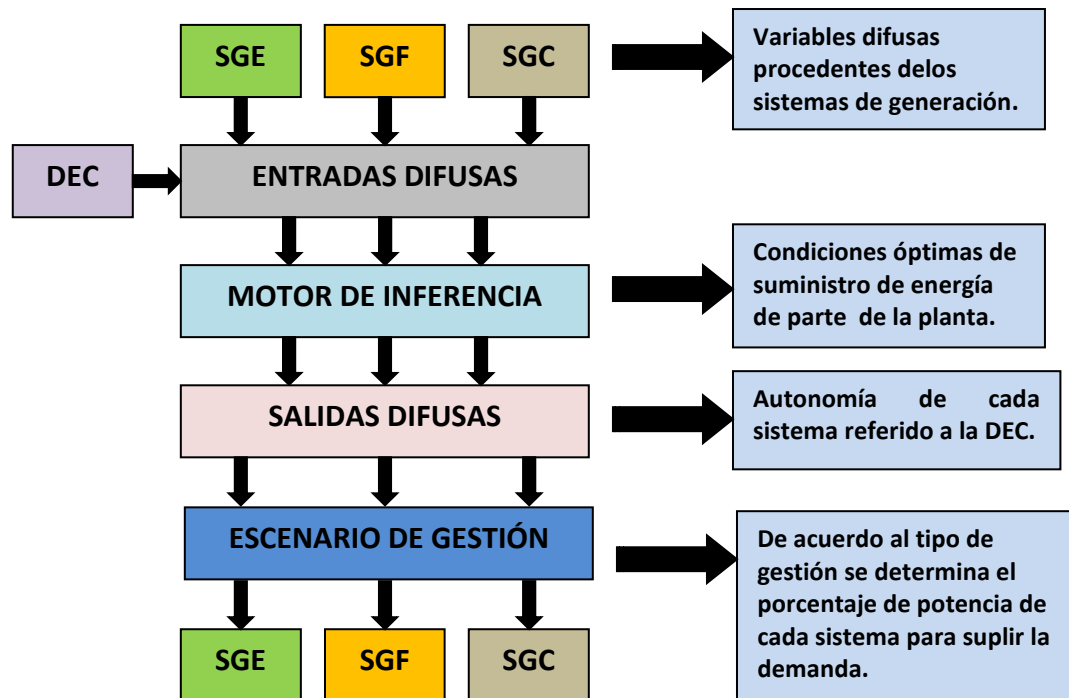


**Figura 3.8. Demanda eléctrica sector industrial.**

Estas curvas de demanda varían con respecto al día de la semana y el mes del año, por tal motivo en la presente investigación se desarrolló un modelo que contempla dichas variables. Para ello además del sector (residencial, comercial e industrial) se introducen variables como estación del año (verano, primavera, otoño e invierno), junto al día de la semana, de esta forma es posible evaluar el comportamiento del sistema para un caso específico de demanda eléctrica.

### **3.4. SISTEMA DE GESTIÓN BASADO EN LÓGICA DIFUSA (GLD).**

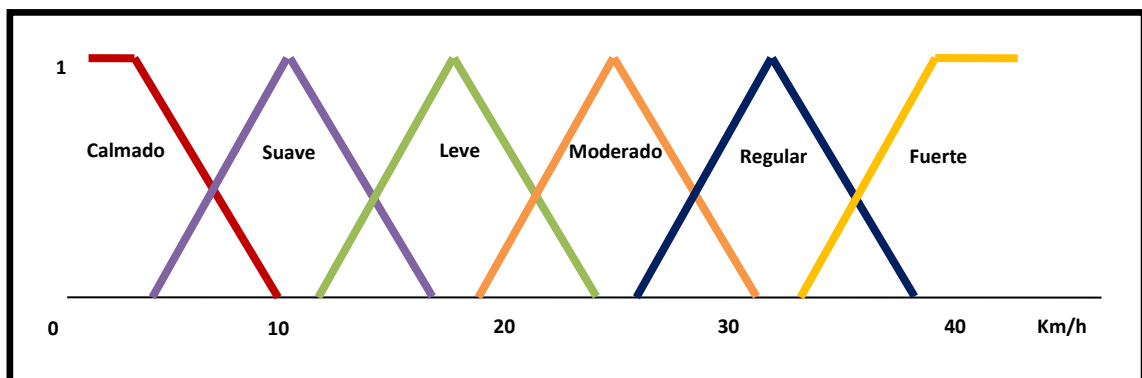
Para el diseño del GLD se utilizó como modelo la estructura de los sistemas basados en lógica difusa que muestra la Figura 3.9, en ella se observa los componentes básicos de un sistema de este tipo. Para la investigación de este trabajo se utilizó un modelo del tipo Mamdani el cual está estructurado como se mostró en el Capítulo 2. Para este modelo se tiene un bloque para las entradas, las cuales han de contener la información de mayor relevancia sobre el sistema que se desea controlar, en el caso planteado para esta investigación, se solicita como entradas las variables meteorológicas de los sistemas como son la velocidad del viento y la irradiación solar, junto con la cantidad de hidrógeno disponible del sistema de celda de combustible, además de la curva de la demanda eléctrica sobre la cual se desea evaluar el sistema, estas entradas del GLD posteriormente son convertidas a valores difusos por medio de las funciones de membresía de las entradas, las cuáles pueden ser de diferentes tipos como se vio en el Capítulo 2. Para este caso en particular, se propone trabajar con las de tipo triangular y trapezoidal dadas su simplicidad y su practicidad. Para el bloque inferencia se empleó un conjunto de reglas de tipo “si entonces”, las cuales contienen la información de los requerimientos que debe cumplir el GLD; para el bloque de las salidas se utilizaron funciones de membresía de tipo triangular y trapezoidal por medio de las cuáles las decisiones tomadas por el GLD son convertidas de difusas en un valor específico por medio del cálculo del centro de gravedad. En la presente investigación se tienen como salidas los porcentajes de autonomía (satisfacción de la demanda) de cada sistema SGE, SGF y SGC sobre la DEC. Una vez obtenida la autonomía de cada sistema es posible gestionar mediante reglas simples la operación de los sistemas bajo distintos escenarios que se describen más adelante.



**Figura 3.9. Modelo en bloques del GLD propuesto.**

#### **Entradas para el GLD.**

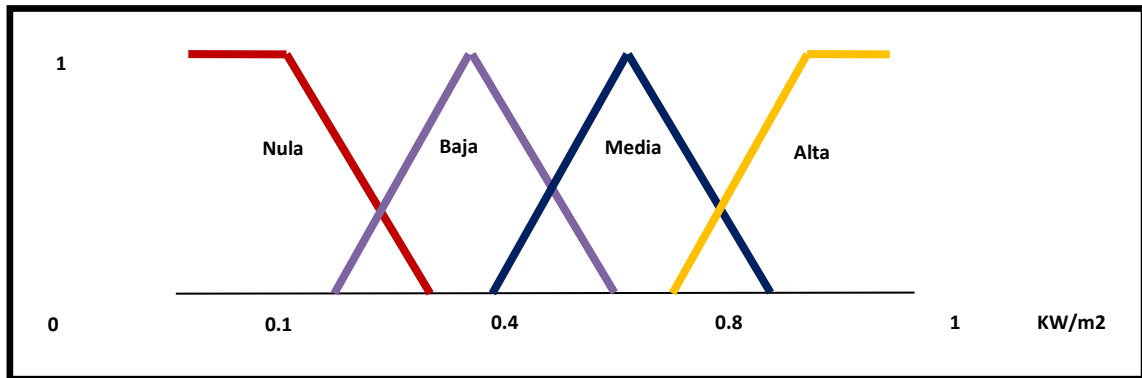
En el diseño del GLD se tomaron como entradas las variables de funcionamiento de la planta de generación alternativa híbrida, que son la velocidad del viento, la irradiación solar y la cantidad de hidrógeno disponible, estas variables inciden directamente en la cantidad de potencia eléctrica que puede generar cada sistema. Dichas variables junto con la demanda eléctrica son ingresadas al GLD para su conversión en valores difusos por medio de las funciones de membresía mostradas en las Figuras 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13.



**Figura 3.10. Función de membresía de entrada al GLD (VELOCIDAD DE VIENTO).**

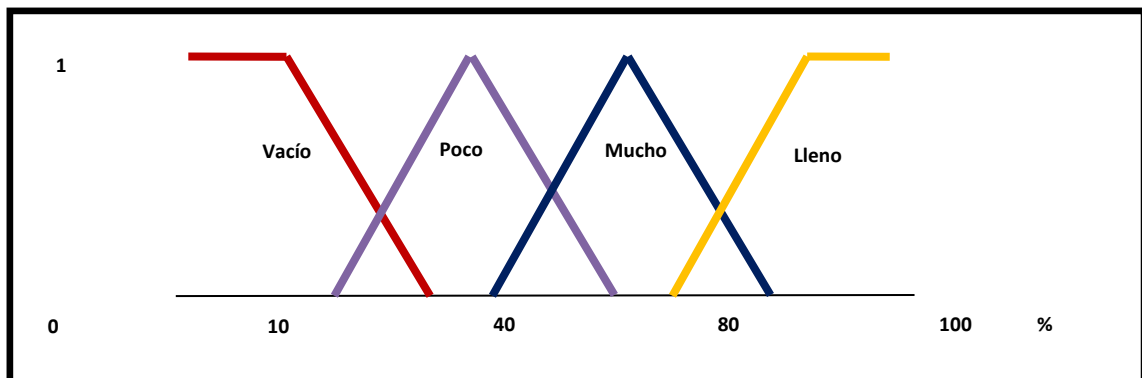


La función de membresía de la entrada proveniente del SGE se encuentra orientada bajo los parámetros descritos por la tabla 3.1 donde se describen los tipos de vientos y sus respectivas velocidades.



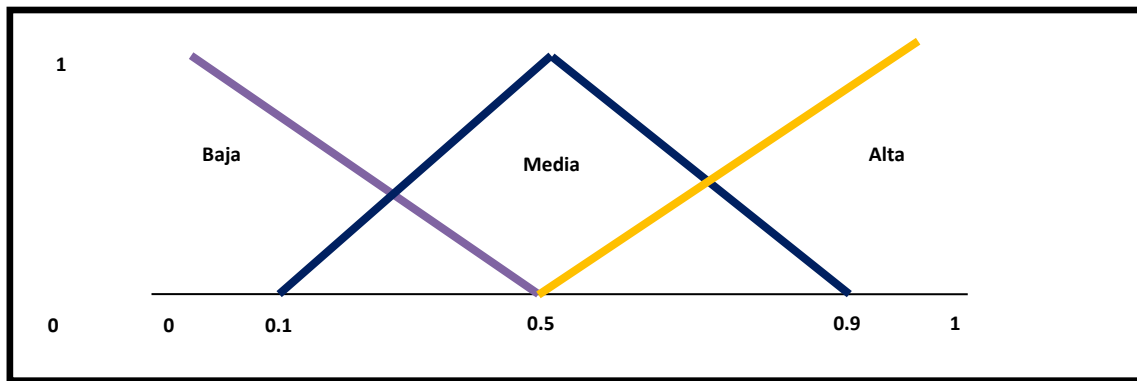
**Figura 3.11. Función de membresía de entrada al GLD (IRRADIACIÓN SOLAR).**

La función de membresía de la entrada proveniente del SGF se realiza teniendo en cuenta la curva de radiación solar diaria mostrada en la Figura 3.3, en esta se observa que el pico de radiación solar se estandariza en  $1 \text{ KW/m}^2$ , que es el caso del medio día totalmente despejado.



**Figura 3.12. Función de membresía de entrada al GLD (NIVEL DE HIDRÓGENO).**

La función de membresía del SGC está determinada por el nivel de hidrógeno que se encuentre almacenado como combustible, esta se toma en porcentaje del combustible contenido en el tanque.



**Figura 3.13. Función de membresía de entrada al GLD (DEMANDA).**

La función de membresía de la entrada DEC se normaliza con respecto a los valores máximo y mínimo de la curva de demanda, de esta forma los valores de demanda eléctrica que se convierten en valores difusos quedan delimitados y pueden aplicarse a cualquier tipo de curva de demanda.

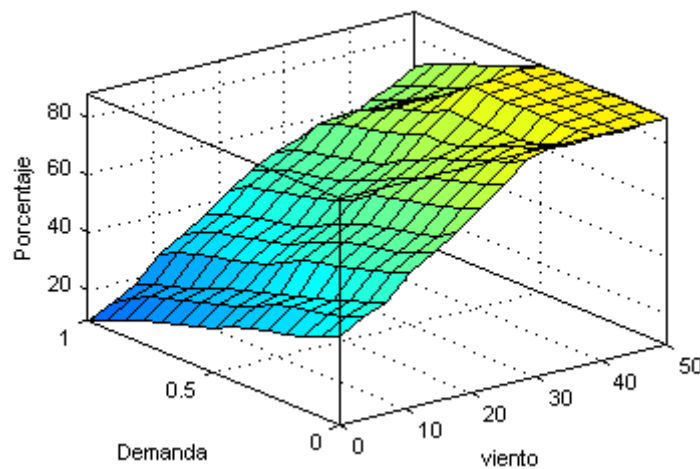
#### **Motor de inferencia de GLD.**

El motor de inferencia del GLD trabaja de acuerdo a reglas del tipo “si entonces” que buscan el cumplimiento de las condiciones óptimas de operación de la planta de generación alternativa de energía propuesta. Estas condiciones están dirigidas a:

- ✓ Cumplir en su totalidad con la DEC, con lo que se lograría un incremento de la autonomía y confiabilidad del sistema propuesto.
- ✓ Determinar la potencia requerida de cada subsistema de la planta de energía alternativa basado en el escenario de gestión seleccionado, con lo que se daría un alto grado de flexibilidad y eficiencia al sistema.
- ✓ Permitir el suministro de energía de la red eléctrica solo en casos en que el sistema híbrido de energía alternativa no pueda cumplir con la DEC.

Para el cumplimiento de dichas condiciones se empleó un conjunto de reglas “Si entonces” basadas en la experiencia recopilada del funcionamiento de cada uno de los sistemas de generación propuestos. Cada subsistema tiene asociado un motor de

inferencia difuso para la determinación de la autonomía o nivel de satisfacción de la DEC del subsistema en cuestión. Este motor de inferencia busca determinar, en función de las variables difusas asociadas a cada subsistema (viento, irradiación y nivel de hidrógeno) y la capacidad propia de cada subsistema (determinada por los parámetros ingresados a cada modelo), cuál es el porcentaje de satisfacción de la DEC de cada subsistema para que de esta forma el GLD pueda determinar mediante reglas simples y según el criterio de gestión determinado, cuál ha de ser el porcentaje de operación de cada uno de los subsistemas. Para determinar el nivel de satisfacción de la demanda por parte del SGE se implementaron 16 reglas teniendo en cuenta las funciones de membresía mostradas en las Figuras 3.10 y 3.13 como las entradas y la Figura 3.17 como la salida. En la Figura 3.14 se muestra la superficie de trabajo en la que se comparan las entradas de demanda y viento con la salida de porcentaje de satisfacción del SGE.



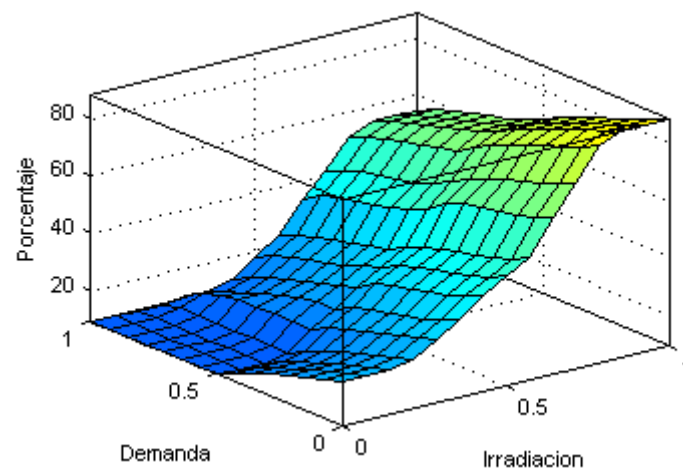
**Figura 3.14. Superficie de trabajo generada por el GLD para la satisfacción del SGE.**

Observando la Figura 3.14 se puede apreciar que su comportamiento puede ser descrito por las reglas asociadas a dicho sistema, estas reglas se enuncian a continuación:

- Si **VIENTO** es **CALMADO** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **NULA**.

- Si **VIENTO** es **CALMADO** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **POCA**.
- Si **VIENTO** es **CALMADO** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MEDIA**.
- Si **VIENTO** es **SUAVE** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **POCA**.
- Si **VIENTO** es **SUAVE** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MEDIA**.
- Si **VIENTO** es **SUAVE** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **ALTA**.
- Si **VIENTO** es **LEVE** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MEDIA**.
- Si **VIENTO** es **LEVE** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **ALTA**.
- Si **VIENTO** es **LEVE** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MUY ALTA**.
- Si **VIENTO** es **MODERADO** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **ALTA**.
- Si **VIENTO** es **MODERADO** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MUY ALTA**.
- Si **VIENTO** es **MODERADO** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **TOTAL**.
- Si **VIENTO** es **REGULAR** y **DEMANDA** NO es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **TOTAL**.
- Si **VIENTO** es **REGULAR** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **ALTA**.
- Si **VIENTO** es **FUERTE** y **DEMANDA** NO es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **TOTAL**.
- Si **VIENTO** es **FUERTE** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MUY ALTA**.

De igual forma para determinar el nivel de satisfacción de la demanda por parte del SGF se implementaron 11 reglas teniendo en cuenta las funciones de membresía mostradas en las Figuras 3.11 y 3.13 como las entradas y la Figura 3.17 como la salida. En la Figura 3.15 se presenta la superficie de trabajo en la que se comparan las entradas de demanda e irradiación solar con la salida de porcentaje de satisfacción del SGF.



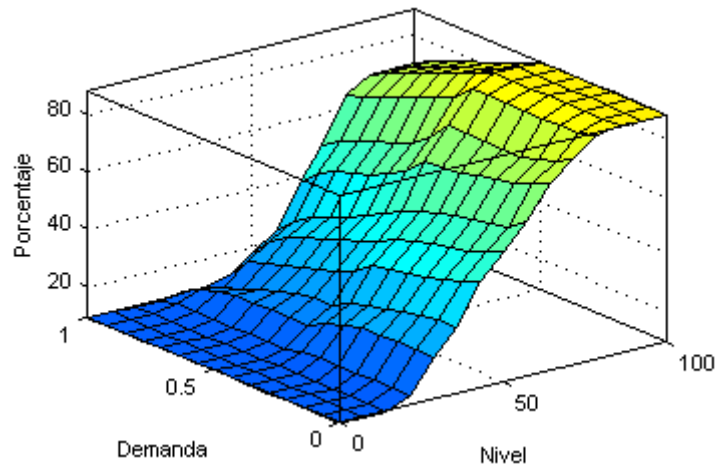
**Figura 3.15. Superficie de trabajo generada por el GLD para la satisfacción del SGF.**

Observando la Figura 3.15 se puede apreciar que su comportamiento puede ser descrito por las reglas asociadas a dicho sistema, estas reglas se enuncian a continuación:

- Si **IRRADIACIÓN** es **NULA** y **DEMANDA** NO es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **NULA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **NULA** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **POCA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **BAJA** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **NULA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **BAJA** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **POCA**.

- Si **IRRADIACIÓN** es **BAJA** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MEDIA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **MEDIA** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **POCA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **MEDIA** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MEDIA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **MEDIA** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **ALTA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **ALTA** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **ALTA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **ALTA** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MUY ALTA**.
- Si **IRRADIACIÓN** es **ALTA** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **TOTAL**.

De igual forma para determinar el nivel de satisfacción de la demanda por parte del SGC se implementaron 9 reglas teniendo en cuenta las funciones de membresía mostradas en las Figuras 3.12 y 3.13 como las entradas y la Figura 3.17 como la salida. En la Figura 3.16 se presenta la superficie de trabajo en la que se comparan las entradas de demanda y nivel de combustible con la salida de porcentaje de satisfacción del SGC.



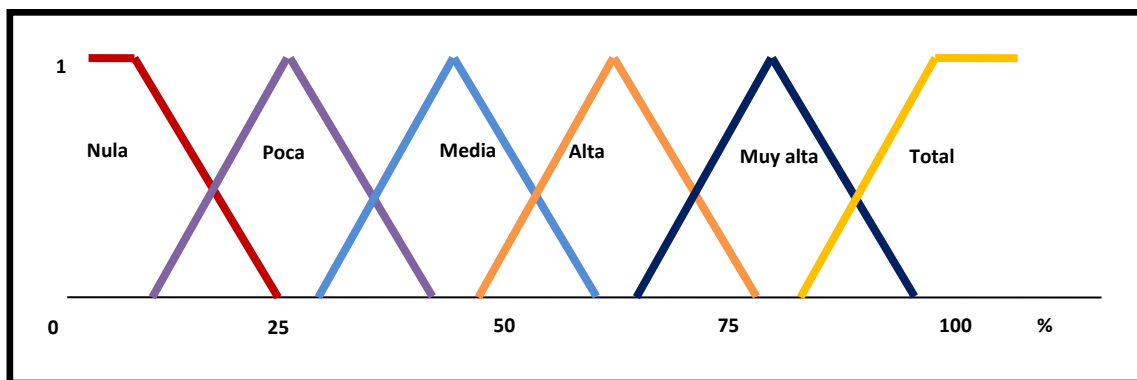
**Figura 3.16. Superficie de trabajo generada por el GLD para la satisfacción del SGC.**

Observando la Figura 3.16 se puede apreciar que su comportamiento puede ser descrito por las reglas asociadas a dicho sistema, estas reglas se enuncian a continuación:

- Si **NIVEL** es **VACIO** entonces **SATISFACCIÓN** es **NULA**.
- Si **NIVEL** es **POCO** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **NULA**.
- Si **NIVEL** es **POCO** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **POCA**.
- Si **NIVEL** es **POCO** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MEDIA**.
- Si **NIVEL** es **MUCHO** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **POCA**.
- Si **NIVEL** es **MUCHO** y **DEMANDA** es **MEDIA** entonces **SATISFACCIÓN** es **ALTA**.
- Si **NIVEL** es **MUCHO** y **DEMANDA** es **BAJA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MUY ALTA**.
- Si **NIVEL** es **LLENO** y **DEMANDA** NO es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **TOTAL**.
- Si **NIVEL** es **LLENO** y **DEMANDA** es **ALTA** entonces **SATISFACCIÓN** es **MUY ALTA**.

### Salidas para el GLD.

En el diseño del GLD se tomaron como salidas la autonomía o porcentaje de satisfacción de la DEC por parte de cada subsistema. En la Figura 3.17 se muestran las funciones de membresía empleadas para determinar la salida o respuesta del GLD. Esta es empleada de igual forma para la obtención de la autonomía en cada subsistema.



**Figura 3.17. Función de membresía de las salidas al GLD.**

Como se puede apreciar la salida del GLD entrega un porcentaje de 0 a 100% de la satisfacción de la demanda que puede manejar cada subsistema por sí solo.

### Escenarios de gestión para el GLD.

Para esta investigación se determinaron los escenarios de gestión que se describen a continuación, estos escenarios buscan mostrar la flexibilidad del GLD ante distintos objetivos de gestión, dichos escenarios son los siguientes:

- ✓ RENTABILIDAD, en este escenario se busca cumplir con la demanda empleando el subsistema más económico. Actualmente los sistemas de generación Eólicos resultan, entre eficiencia y costos más rentables que los fotovoltaicos y estos a su vez que los de celda de combustible.
- ✓ CONFIABILIDAD, para este escenario el gestor dará prioridad al subsistema que se encuentre generando la mayor cantidad de potencia para una DEC específica.



- ✓ PRIORIDAD, en este modo el orden del suministro de energía de cada subsistema, es indicado por el operario bajo sus propios criterios.
- ✓ PORCENTAJE, para esta selección se deben introducir los porcentajes máximos de operación, que se requieren a criterio del operario para cada subsistema, teniendo en cuenta que el conjunto que forma la planta puede entregar de 0 al 100% de la potencia requerida por la DEC.

### **3.5. IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA.**

Para la implementación de la propuesta se desarrolló una herramienta computacional con interfaz gráfica que contiene los modelos de los subsistemas SGE, SGF y SGC junto con todos los parámetros de ajuste de los mismos y las entradas difusas con las que se ha de gestionar el sistema de generación de energía alternativa híbrido.

Básicamente en primera instancia se debe seleccionar la curva de demanda sobre la cual el sistema trabajará, esta curva es ponderada mediante un sistema de inferencia difusa que toma las entradas de sector, mes, día y hora con lo que genera la curva respectiva para ese tipo de parámetros. Posteriormente se cargan los parámetros de trabajo para los subsistemas SGE, SGF y SGC donde se calcula la potencia nominal de cada uno de ellos, y se seleccionaran cuáles de los subsistemas han de ser habilitados para dicha gestión. En este caso, es posible el realizar siete combinaciones dado que son tres sistemas y que al menos un subsistema debe encontrarse habilitado junto con la red para que el sistema pueda determinar una gestión. La herramienta podrá ejecutarse para un punto específico de la curva o si se requiere puede analizar toda la curva un número de veces determinadas con lo que es posible obtener  $n$  casos para una misma curva. En la Figura 3.18 se presenta la herramienta implementada para la elaboración de los experimentos sobre el GLD. En esta se puede ver la etapa de modelado de la DEC donde se calcula la curva de demanda de acuerdo a la los parámetros de sector, temporada, día y hora, también se aprecia el bloque de modelado de la planta en el que es posible ingresar los parámetros específicos de cada una de las fuentes de energía renovable que son empleadas en este trabajo, en cada

caso es posible el modificar la entrada difusa de cada subsistema de acuerdo a los valores de membresía vistos en la Sección 3.4. En los controles del gestor es posible seleccionar las fuentes que intervendrán en el estudio de forma manual o aleatoria y observar la gestión del sistema de acuerdo a los criterios presentados en la Sección 3.4. Entre las opciones de evaluación de los casos de estudio se puede seleccionar un caso particular o realizar  $n$  casos para una curva determinada diaria. Los controles de resultados seleccionan la(s) curva(s) de respuesta en valor de potencia eléctrica de cada sistema junto con la demanda. En el gráfico de satisfacción de la demanda se presenta el porcentaje de satisfacción obtenido por el GLD para el caso determinado y en el gráfico de porcentaje de operación se presentan los porcentajes determinados por el GLD para la entrega de potencia de cada subsistema y la red teniendo en cuenta el criterio de gestión seleccionado.

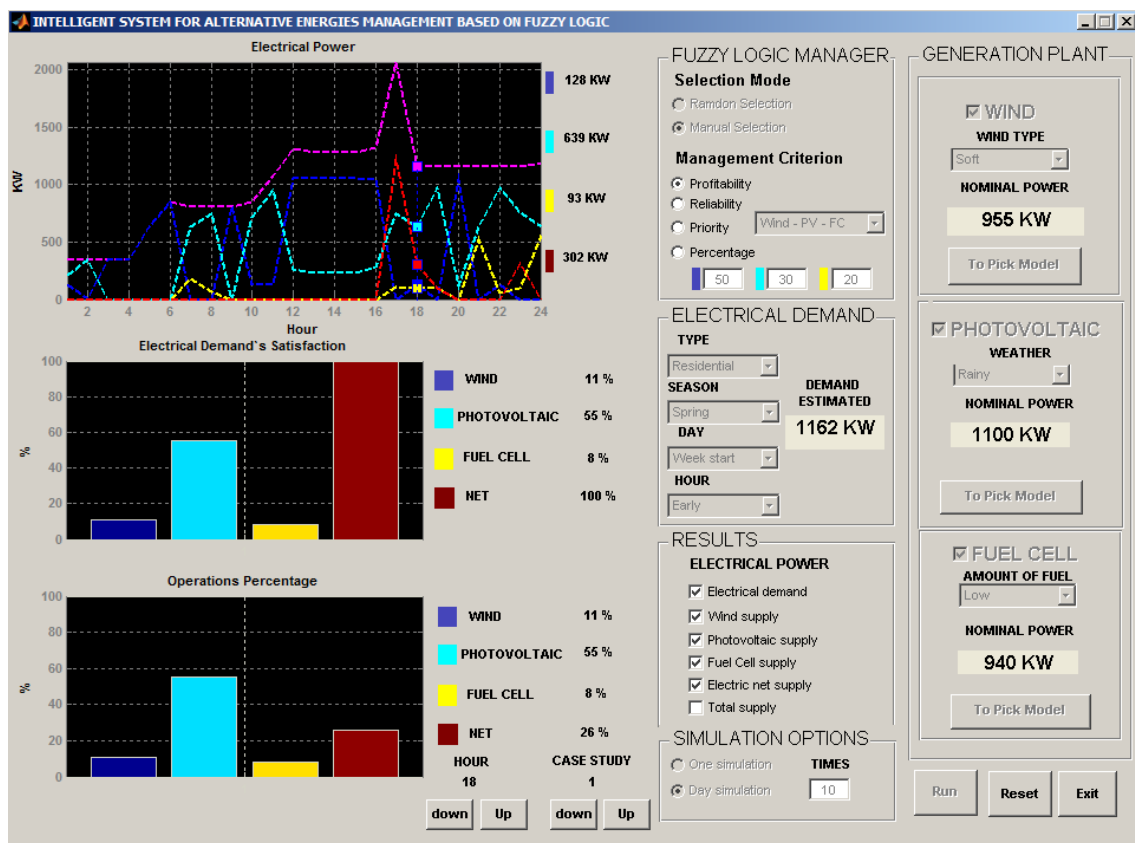


Figura 3.18. Interfaz implementada para la evaluación del GLD.

### 3.5.1. OBTENCIÓN DE CURVAS DE DEMANDA ELÉCTRICA.

Mediante el sistema implementado para la investigación se establece y pondera la curva de demanda sobre la cual se desea trabajar. Dicha curva contiene las variables temporales necesarias para su determinación, las cuales son el sector, la temporada del año, el día de la semana y la hora del día. Dada las combinaciones de estas entradas se obtendrán diferentes tipos de curvas sobre las cuales ha de realizarse la gestión. Este conjunto de curvas resultan de la información histórica del comportamiento de la demanda en los sectores mencionados. Por otro lado es posible ingresar una curva de demanda predefinida para su posterior estudio, el gestor es capaz de trabajar bajo cualquier curva establecida y determinar la gestión adecuada para cada escenario. Las curvas de demanda eléctrica obtenidas son de la forma descrita en el Capítulo 3. En la Figura 3.19 se muestra el panel de control donde se ingresan los parámetros para la obtención de la curva de demanda, como se puede ver cada parámetro posee un menú desplegable que contiene los descriptores para obtener la DEC, estos valores son:

- TIPO:
  - Residencial.
  - Comercial.
  - Industrial.
  
- TEMPORADA:
  - Primavera.
  - Verano.
  - Otoño.
  - Invierno.
  
- DÍA:
  - Inicio de semana.
  - Mitad de semana.
  - Fin de semana.
  
- HORA:
  - Madrugada.
  - Mañana.
  - Tarde.
  - Noche.

**ELECTRICAL DEMAND**

**TYPE**  
Residential

**SEASON**  
Spring

**DAY**  
Week start

**HOUR**  
Early

**DEMAND ESTIMATED**  
**345 KW**

**Figura 3.19. Panel de control demanda eléctrica.**

### **3.5.2. POTENCIA NOMINAL DE LA PLANTA DE ENERGÍA ALTERNATIVA.**

Empleando los modelos descritos en el Capítulo 3 se obtiene la potencia nominal de cada uno de los subsistemas de acuerdo a sus parámetros de trabajo y la potencia real de trabajo de cada subsistema es dependiente de los valores que tomen sus variables de funcionamiento como son en el caso del subsistema eólico: la velocidad del viento, en el subsistema fotovoltaico: la irradiación solar, y en el subsistema de celda de combustible: el nivel de hidrógeno. La combinación de estos tres subsistemas derivan en la potencia nominal que tiene la planta de energía alternativa y la potencia que ésta puede suministrar en algunos casos será mayor o menor debido a la dependencia de las variables aleatorias antes mencionadas. En la Figura 3.20, 3.21 y 3.22 se observan los paneles de control de cada uno de los subsistemas descritos en el inciso 3.2 de este capítulo, en estos se aprecian las distintas variables que determinan la potencia nominal de cada uno de ellos.

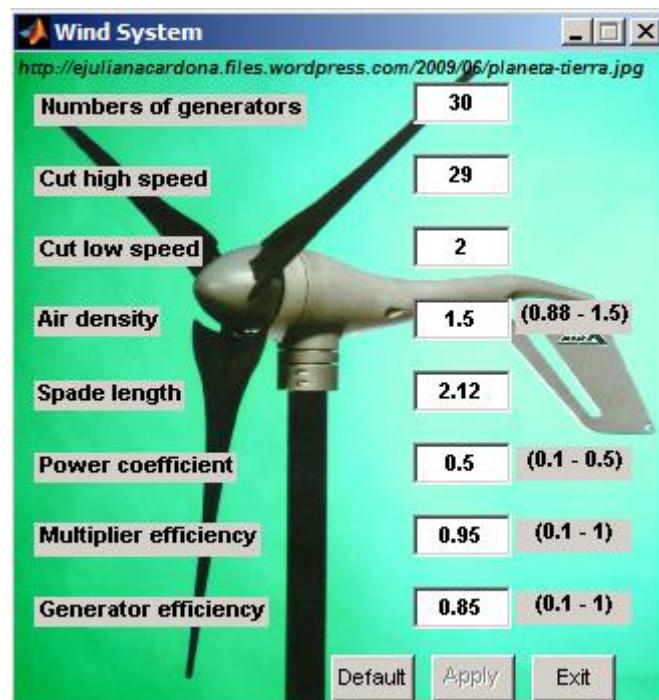


Figura 3.20. Panel de control sistema eólico.

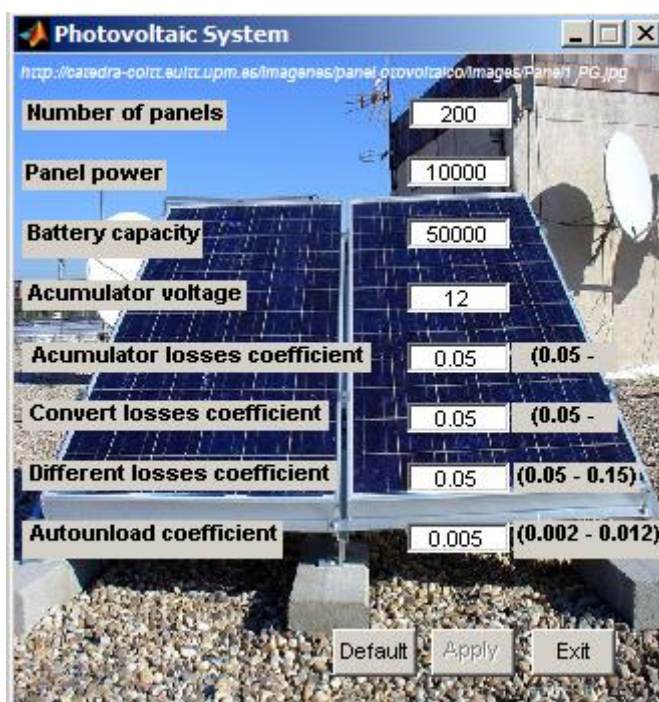
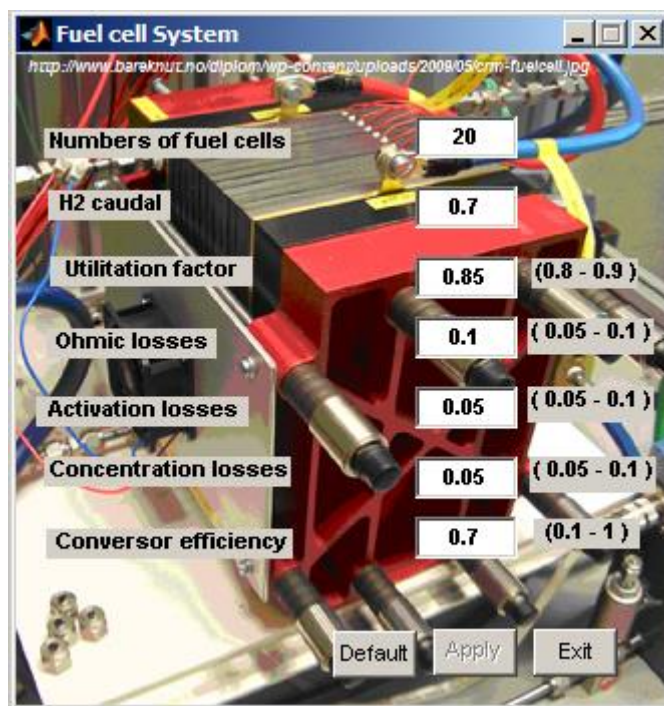


Figura 3.21. Panel de control sistema fotovoltaico.



**Figura 3.22. Panel de control sistema celda de combustible.**

En la Figura 3.23 se muestra en conjunto el sistema híbrido, se puede apreciar la potencia nominal de cada uno de los subsistemas para los parámetros mostrados en las figuras anteriores. En este mismo panel es posible ubicar de forma manual (para evaluar un caso particular) las entradas difusas de cada sistema mediante los descriptores para las entradas al GLD vistos en la Sección 3.4.

### **3.5.3. GESTIÓN DE LA ENERGÍA GENERADA POR LA PLANTA.**

La gestión de la energía generada por cada subsistema de la planta es efectuada por el GLD que ha de determinar, mediante el sensado de las variables aleatorias de cada subsistema, cuál es el nivel de satisfacción de la demanda de cada uno de ellos sobre la demanda eléctrica, para luego indicar el porcentaje de potencia eléctrica requerido de cada subsistema de acuerdo al escenario de gestión seleccionado. Esta gestión y la determinación del porcentaje de satisfacción de la demanda son realizadas por el motor de inferencia de lógica difusa detallado en la Sección 3.4 que hace parte del

GLD. El escenario de gestión que se desea estudiar puede ser seleccionado en el panel del GLD mostrado en la Figura 3.24.

#### **3.5.4. VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS.**

Para mostrar los resultados obtenidos en el estudio de diferentes casos para el GLD se tienen tres gráficas, la mostrada en la Figura 3.25 visualiza las curvas de potencia entregada por cada subsistema para cumplir con la DEC. En esta gráfica es posible comparar los comportamientos del suministro de potencia de cada subsistema, incluyendo la red, con respecto de la DEC en cada hora del día estudiado, esto es posible utilizando el panel de resultados mostrado en la Figura 3.26. En la gráfica presentada en la Figura 3.27 se muestra en barras de porcentaje el nivel de satisfacción de la DEC de cada uno de los subsistemas y el porcentaje de operación de cada subsistema de acuerdo al criterio seleccionado en el panel presentado en la Figura 3.24.

GENERATION PLANT

☒ **WIND**  
WIND TYPE  

Soft

NOMINAL POWER  

955 KW

To Pick Model

☒ **PHOTOVOLTAIC**  
WEATHER  

Rainy

NOMINAL POWER  

2600 KW

To Pick Model

☒ **FUEL CELL**  
AMOUNT OF FUEL  

Full

NOMINAL POWER  

1103 KW

To Pick Model

Figura 3.23. Panel de selección de la planta de generación alternativa híbrida.

FUZZY LOGIC MANAGER

**Selection Mode**  
☐ Random Selection  
☒ Manual Selection

**Management Criterion**  
☒ Profitability  
☐ Reliability  
☐ Priority  
☐ Percentage

Wind - PV - FC

503020

Figura 3.24. Panel de selección de criterio para el GLD.



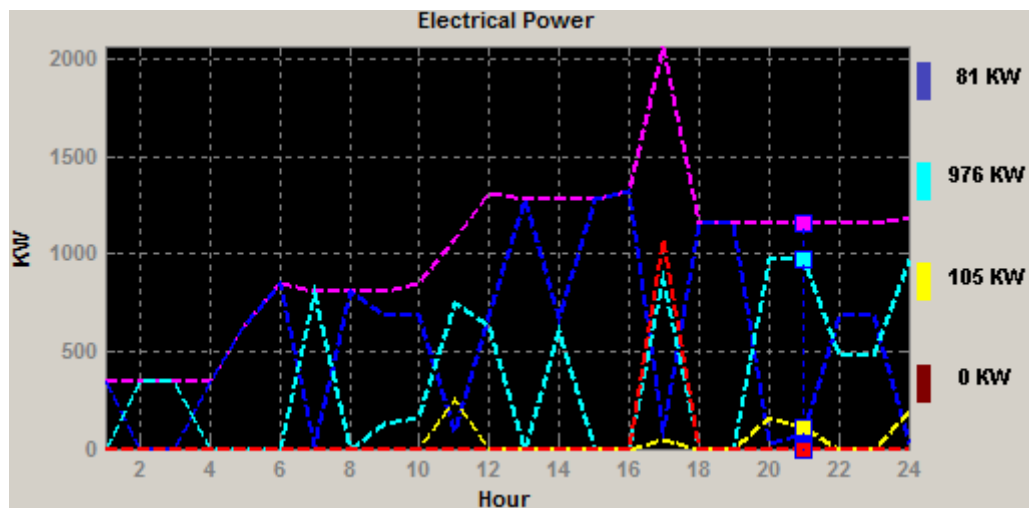


Figura 3.25. Curvas de potencia eléctrica suministrada por cada sistema.

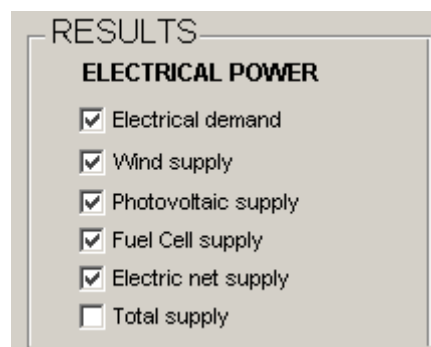
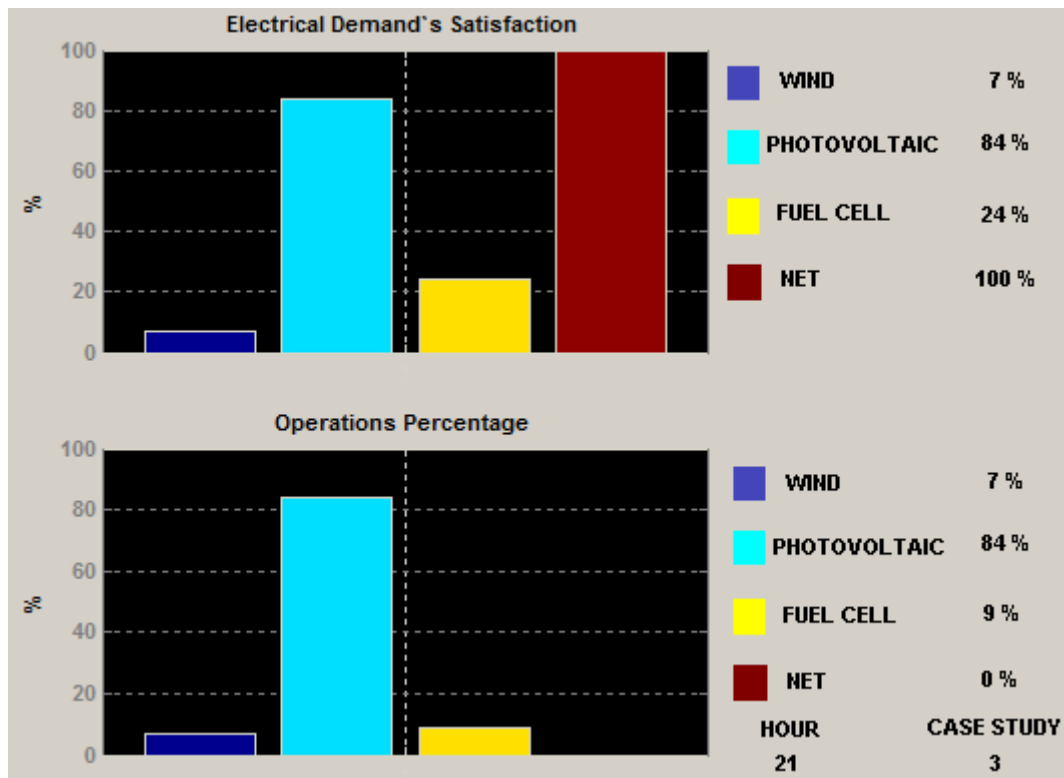


Figura 3.26. Panel de visualización de curvas de potencia eléctrica suministrada por cada sistema.



**Figura 3.27. Nivel de satisfacción de la demanda eléctrica requerida por la carga (DEC) y porcentaje de operación de cada sistema.**

En el siguiente capítulo se presentaran los resultados obtenidos en esta investigación, se evaluará el funcionamiento del GLD en diferentes escenarios y se analizarán las respuestas del mismo frente a dichos escenarios, empleando la herramienta computacional con interfaz gráfica descrita en este capítulo.

---

# 4

## RESULTADOS OBTENIDOS EN LA INVESTIGACIÓN

---

Teniendo en cuenta la propuesta planteada en el Capítulo 3 se diseñaron y realizaron múltiples experimentos bajo el sistema implementado para la investigación, en dichos experimentos se ingresaron los parámetros estándares de trabajo de las plantas de generación y se introdujeron las variables que inciden en el modelo de demanda. Posteriormente, se realizaron las pruebas teniendo como variables aleatorias el viento, la irradiación y nivel de hidrógeno, con lo que fue posible observar el comportamiento del sistema de gestión basado en lógica difusa y de esta forma verificar y validar su funcionamiento.

### **4.1. EVALUACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL GESTOR BASADO EN LÓGICA DIFUSA (GLD).**

En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros establecidos para la curva de demanda y la potencia nominal de cada uno de los subsistemas SGE, SGF y SGC respectivamente. Esta potencia es obtenida a partir de los modelos presentados en el Capítulo 3. Los

parámetros de estos modelos se ingresan por medio del sistema descrito en la Sección 3.5.2. La curva de la DEC sobre la cual se realiza la gestión por parte del GLD es resultado de los parámetros cargados al sistema descrito en la Sección (3.5.1.) Para estudiar el funcionamiento del GLD se realizaron y analizaron variados casos de estudios de un día en el cual los parámetros de velocidad de viento, irradiación solar y nivel de hidrógeno, varían de forma pseudo-aleatoria dando como resultado un cambio en la potencia real que cada subsistema está en capacidad de entregar. Las Tablas 4.2 y 4.4 presentan los experimentos realizados y las Tablas 4.3 y 4.5 contienen los resultados de la respuesta del GLD para los escenarios de rentabilidad y confiabilidad presentados en la sección 3.4.

DEMANDA			POTENCIA NOMINAL (KW)		
TIPO	TEMPORADA	DIA	SGE	SGF	SGC
Residencial	Verano	Inicio de semana	1109	1100	940

**Tabla 4.1. Parámetros de demanda y sistemas alternativos para la evaluación del GLD.**

En la Tabla 4.2 se aprecian los casos de estudio más representativos a la hora de evaluar el funcionamiento del GLD, en ella se presentan las variables de entrada para los experimentos o casos de estudio, se tiene de esta forma la hora del día, se indica en la disponibilidad cuáles de los subsistemas se encuentran activos y se muestran para esa hora específica qué valores poseen las entradas difusas de velocidad de viento, irradiación solar y nivel de hidrógeno (estas son generadas de forma aleatoria).

La Tabla 4.3 muestra los resultados de la prueba del GLD para los escenarios de rentabilidad y confiabilidad. Al realizar una comparación se puede observar que en el escenario de rentabilidad el sistema siempre intenta entregar en mayor medida la energía proveniente del SGE y en su defecto la del SGF, cumpliendo con el requerimiento de emplear el SGC en menor medida dado que es el sistema que resulta más costoso. Si se observa el escenario de confiabilidad, se puede notar que el sistema

toma su decisión de acuerdo a la satisfacción de la DEC y prioriza la toma de energía del sistema con mayor satisfacción.

CASO	hora	DISPONIBILIDAD			ENTRADAS DIFUSAS		
		SGE	SGF	SGC	VIENTO	IRRADIACIÓN	NIVEL H
1	3	X	X	X	Leve	Media	Lleno
2	5	X	X	X	Regular	Baja	Vacío
3	11	X	X	X	Moderado	Nula	Poco
4	14	X	X	X	Suave	Media	Vacío
5	19	X	X	X	Moderado	Alta	Lleno
6	23	X	X	X	Suave	Media	Poco
7	10	X	X		Leve	Baja	-
8	19	X	X		Moderado	Baja	-
9	22	X	X		Moderado	Baja	-
10	24	X	X		Moderado	Baja	-
11	7		X	X	-	Alta	Medio
12	11		X	X	-	Baja	Poco
13	15		X	X	-	Media	Lleno
14	23		X	X	-	Media	Vacío
15	6	X		X	Calmado	-	Poco
16	10	X		X	Moderado	-	Lleno
17	18	X		X	Moderado	-	Lleno
18	23	X		X	Fuerte	-	Poco
19	3	X			Moderado	-	-
20	11	X			Fuerte	-	-
21	18	X			Suave	-	-
22	7		X		-	Baja	-
23	12		X		-	Media	-
24	17		X		-	Alta	-
25	7			X	-	-	Medio
26	12			X	-	-	Lleno
27	17			X	-	-	Vacía

**Tabla 4.2. Casos de experimentos para evaluación del GLD.**

La Tabla 4.4 muestra el experimento diseñado para evaluar el GLD cuando existe una prioridad de operación de los subsistemas preestablecida, en esta tabla se muestra la

hora del día, el orden de prioridad de los subsistemas y el valor de cada variable aleatoria de velocidad de viento, irradiación solar y nivel de hidrógeno.

CASO	SATISFACIÓN			ESCENARIO DE GESTION							
				RENTABILIDAD				CONFIABILIDAD			
	SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
1	25%	100%	100%	25%	75%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
2	100%	100%	7%	100%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
3	63%	100%	26%	63%	37%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
4	1%	67%	4%	1%	67%	4%	28%	1%	67%	4%	28%
5	7%	84%	81%	7%	84%	9%	0%	0%	84%	16%	0%
6	2%	74%	24%	2%	74%	24%	0%	2%	74%	24%	0%
7	10%	88%	-	10%	88%	-	2%	10%	88%	-	2%
8	59%	65%	-	59%	41%	-	0%	35%	65%	-	0%
9	59%	65%	-	59%	41%	-	0%	35%	65%	-	0%
10	58%	63%	-	58%	42%	-	0%	37%	63%	-	0%
11	-	100%	69%	-	100%	0%	0%	-	100%	0%	0%
12	-	69%	26%	-	69%	26%	5%	-	69%	26%	5%
13	-	67%	73%	-	67%	33%	0%	-	27%	73%	0%
14	-	74%	4%	-	74%	4%	22%	-	74%	4%	22%
15	0%	-	33%	0%	-	33%	67%	0%	-	33%	67%
16	10%	-	100%	10%	-	90%	0%	0%	-	100%	0%
17	59%	-	81%	59%	-	41%	0%	19%	-	81%	0%
18	100%	-	24%	100%	-	0%	0%	100%	-	0%	0%
19	25%	-	-	25%	-	-	75%	25%	-	-	75%
20	100%	-	-	100%	-	-	0%	100%	-	-	0%
21	2%	-	-	2%	-	-	98%	2%	-	-	98%
22	-	92%	-	-	92%	-	8%	-	92%	-	8%
23	-	66%	-	-	66%	-	34%	-	66%	-	34%
24	-	47%	-	-	47%	-	53%	-	47%	-	53%
25	-	-	69%	-	-	69%	31%	-	-	69%	31%
26	-	-	71%	-	-	71%	29%	-	-	71%	29%
27	-	-	2%	-	-	2%	98%	-	-	2%	98%

**Tabla 4.3. Resultados de la evaluación del GLD en escenarios de rentabilidad y confiabilidad.**

La Tabla 4.5 recopila los resultados de la evaluación del GLD cuando hay una prioridad preestablecida, se puede apreciar que el GLD orienta el flujo energético de acuerdo al orden de importancia suministrado de forma previa.

PRIORIDAD							
CASO	hora	ORDEN			VIENTO	IRRADIACIÓN	NIVEL H
		SGE	SGF	SGC			
1	3	1	2	3	Leve	Media	Lleno
2	3	1	3	2	Leve	Media	Lleno
3	3	2	1	3	Leve	Media	Lleno
4	3	3	1	2	Leve	Media	Lleno
5	3	2	3	1	Leve	Media	Lleno
6	3	3	2	1	Leve	Media	Lleno
7	11	1	2	3	Moderado	Nula	Poco
8	11	1	3	2	Moderado	Nula	Poco
9	11	2	1	3	Moderado	Nula	Poco
10	11	3	1	2	Moderado	Nula	Poco
11	11	2	3	1	Moderado	Nula	Poco
12	11	3	2	1	Moderado	Nula	Poco
13	14	1	2	3	Suave	Media	Vacío
14	14	1	3	2	Suave	Media	Vacío
15	14	2	1	3	Suave	Media	Vacío
16	14	3	1	2	Suave	Media	Vacío
17	14	2	3	1	Suave	Media	Vacío
18	14	3	2	1	Suave	Media	Vacío
19	23	1	2	3	Suave	Media	Poco
20	23	1	3	2	Suave	Media	Poco
21	23	2	1	3	Suave	Media	Poco
22	23	3	1	2	Suave	Media	Poco
23	23	2	3	1	Suave	Media	Poco
24	23	3	2	1	Suave	Media	Poco

**Tabla 4.4. Casos de experimentos para la evaluación del GLD en escenario de prioridad preestablecida.**

Las Figuras 4.1 a 4.15 muestran los resultados para la gestión por los criterios o escenarios propuestos en el Capítulo 3, en estas figuras se observan la curva de

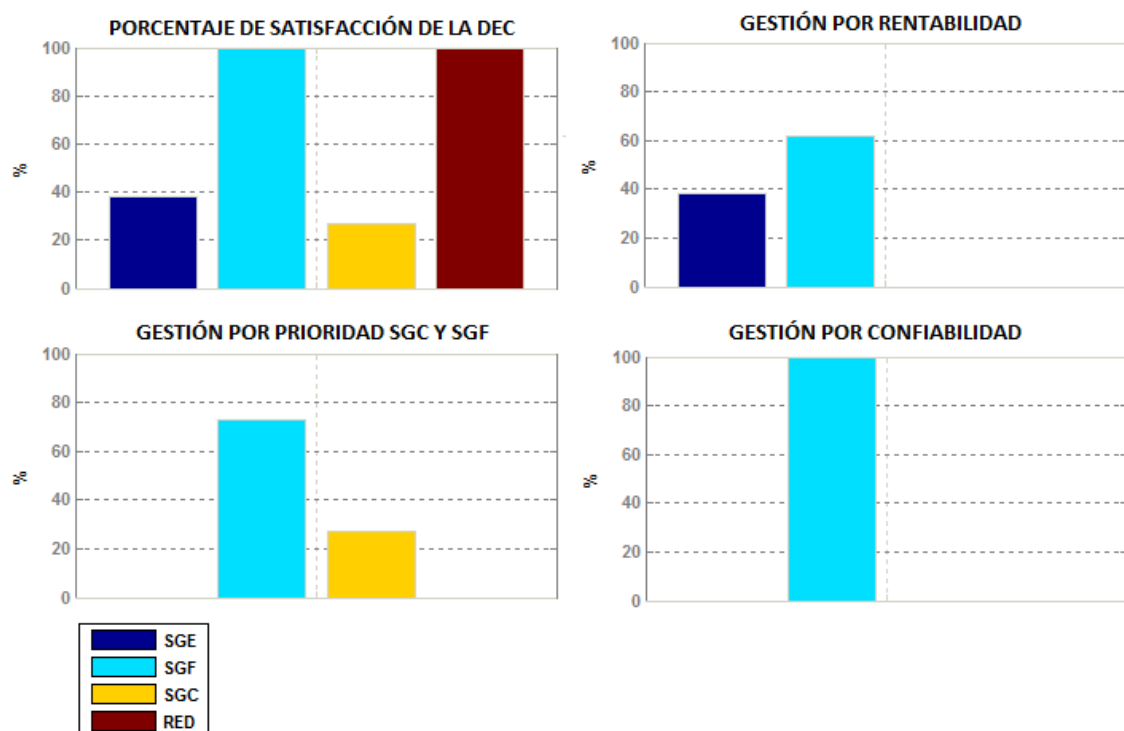
demanda que se desea suplir junto con la potencia entregada por cada sistema para el día de estudio, al mismo tiempo se muestra el porcentaje de satisfacción de la demanda de cada subsistema y la gestión determinada por el GLD. Estas figuras son la recopilación de los casos más demostrativos generados de forma pseudo-aleatoria por el sistema presentado en el Capítulo 3 y que serán útiles para el análisis del presente trabajo.

CASO	PRIORIDAD						
	SATISFACCIÓN			GESTIÓN			
	SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED
1	25%	100%	100%	25%	75%	0%	0%
2	25%	100%	100%	25%	0%	75%	0%
3	25%	100%	100%	0%	100%	0%	0%
4	25%	100%	100%	0%	100%	0%	0%
5	25%	100%	100%	0%	0%	100%	0%
6	25%	100%	100%	0%	0%	100%	0%
7	63%	100%	26%	63%	37%	0%	0%
8	63%	100%	26%	63%	11%	26%	0%
9	63%	100%	26%	0%	100%	0%	0%
10	63%	100%	26%	0%	100%	0%	0%
11	63%	100%	26%	63%	11%	26%	0%
12	63%	100%	26%	0%	74%	26%	0%
13	1%	67%	4%	1%	67%	4%	28%
14	1%	67%	4%	1%	67%	4%	28%
15	1%	67%	4%	1%	67%	4%	28%
16	1%	67%	4%	1%	67%	4%	28%
17	1%	67%	4%	1%	67%	4%	28%
18	1%	67%	4%	1%	67%	4%	28%
19	2%	74%	24%	2%	74%	24%	0%
20	2%	74%	24%	2%	74%	24%	0%
21	2%	74%	24%	2%	74%	24%	0%
22	2%	74%	24%	2%	74%	24%	0%
23	2%	74%	24%	2%	74%	24%	0%
24	2%	74%	24%	2%	74%	24%	0%

**Tabla 4.5. Resultados de la evaluación del GLD en escenario de prioridad preestablecida.**

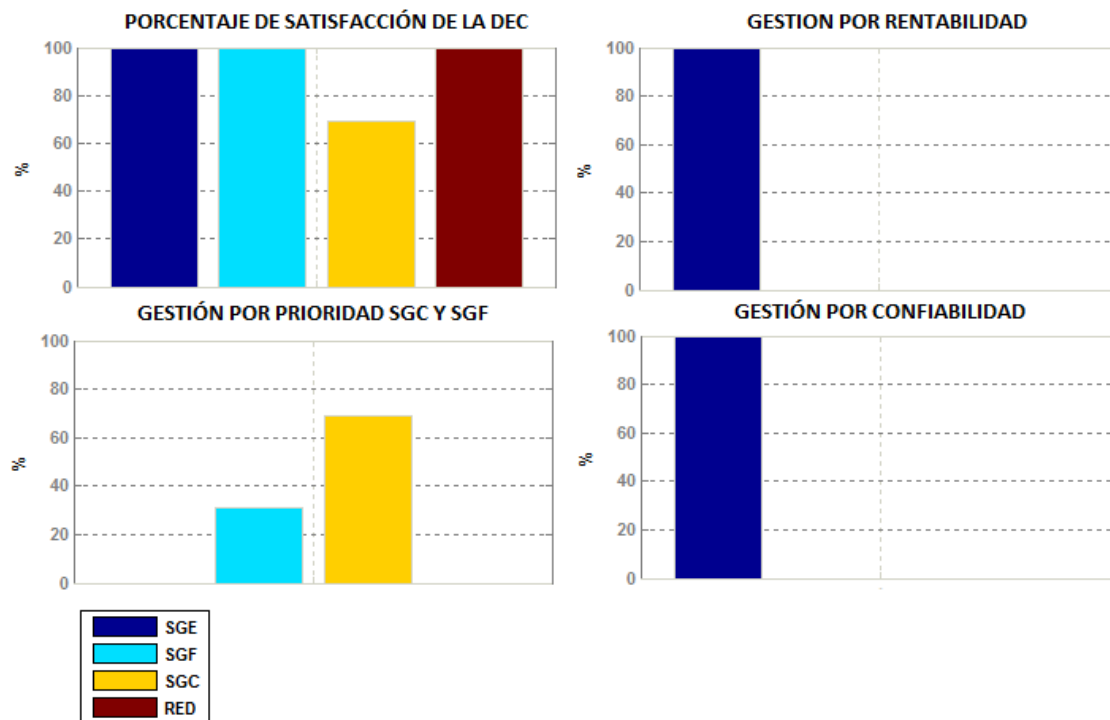


En las Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se presenta el consolidado de la evaluación del GLD en tres escenarios que son el de rentabilidad, confiabilidad y prioridad del SGC y SGF. La comparación se realiza en un mismo caso y a una misma hora, bajo las mismas condiciones ambientales, lo que deriva en un nivel de satisfacción de la DEC idéntico. En las Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10, se observan las gráficas de la curva de demanda ponderada para el caso de estudio junto con las curvas de potencia de las fuentes activas, el porcentaje de satisfacción de cada una de las fuentes activas y el respectivo porcentaje de empleo de cada fuente producto de la gestión realizada por el GLD de acuerdo al escenario de rentabilidad en las horas del día seleccionadas (2, 8, 13, 20 y 21 horas). En estas se puede verificar que el sistema escoge al SGE como el sistema con mayor prioridad y solo en el caso en que éste no le sea posible cumplir con la DEC entran en servicio el SGF y/o el SGC en el orden respectivo, en última instancia entra la red.



**Figura 4.1. Comparación del GLD por criterio hora 2.**

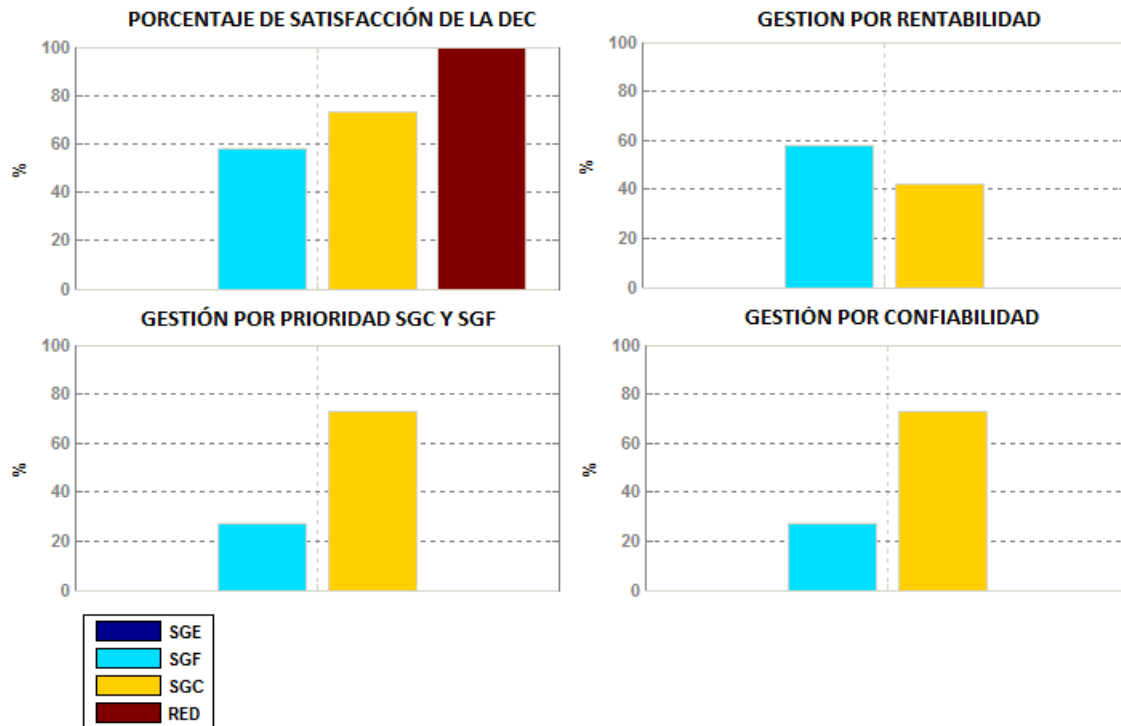
La Figura 4.1 muestra la comparación de los resultados provistos por el GLD para los criterios de rentabilidad, confiabilidad y prioridad (SGC y SGF), esta muestra claramente que el GLD cumple con los criterios mencionados para el nivel de satisfacción de la DEC previamente calculado.



**Figura 4.2. Comparación del GLD por criterio hora 8.**

En la Figura 4.2 se puede apreciar que la respuesta de gestión por rentabilidad y confiabilidad es idéntica dado que bajo los parámetros que determinan el nivel de satisfacción de cada sistema, el SGE es la fuente más rentable y confiable en ese momento.

En la Figura 4.3 se observa que al tener un nivel de satisfacción de la DEC muy bajo el SGE, entonces el SGF pasa a ser la fuente más rentable. Sin embargo, por confiabilidad el SGC tiene mayor prioridad, razón por la cual el gráfico de gestión por prioridad y confiabilidad es igual.



**Figura 4.3. Comparación del GLD por criterio hora 13.**

En la Figura 4.4 se presenta un caso similar al de la Figura 4.3 ya que la gestión por confiabilidad y prioridad son las mismas. Sin embargo, al existir suministro de parte del SGE en la gestión por rentabilidad esta es tomada como primera opción.

En la Figura 4.5 se observa el caso en que el GLD determina una gestión igual para los tres escenarios. Esto debido a que para éste caso específico se cumple que el sistema más rentable es el SGE seguido del SGF; el más confiable es el SGF y el orden prioritario es asignado al SGC. Como se puede ver, en ninguno de los tres escenarios presentados es posible cumplir con la demanda sin emplear la red.

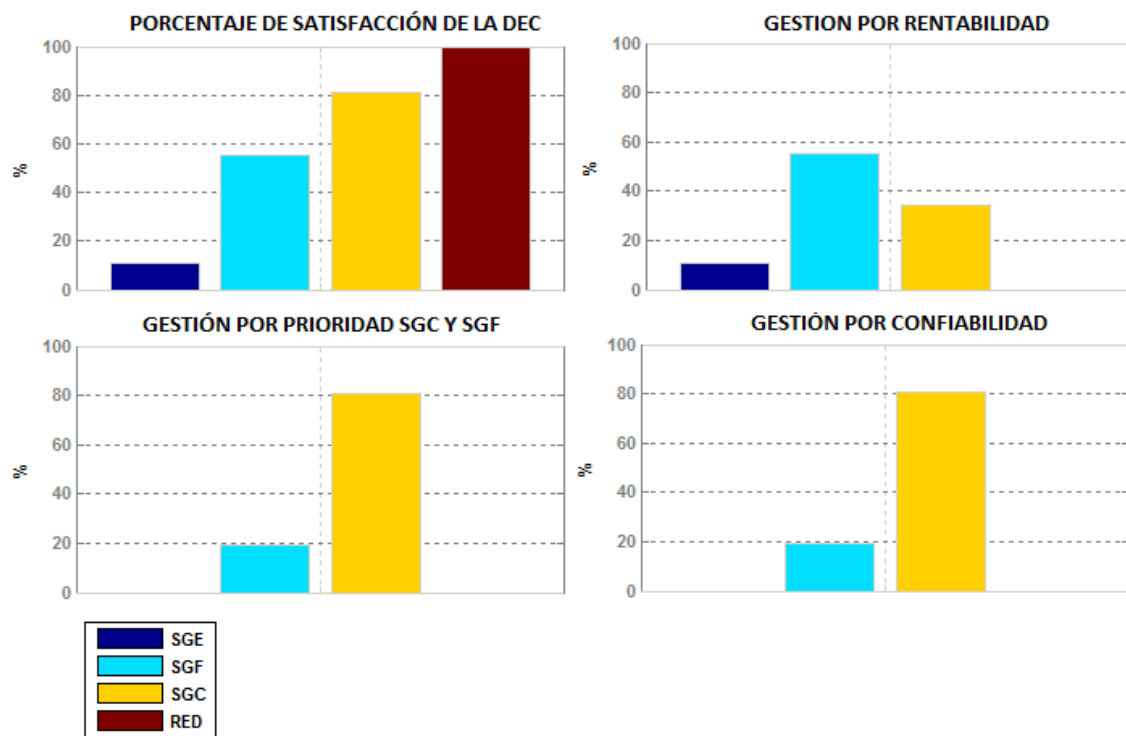


Figura 4.4. Comparación del GLD por criterio hora 20.

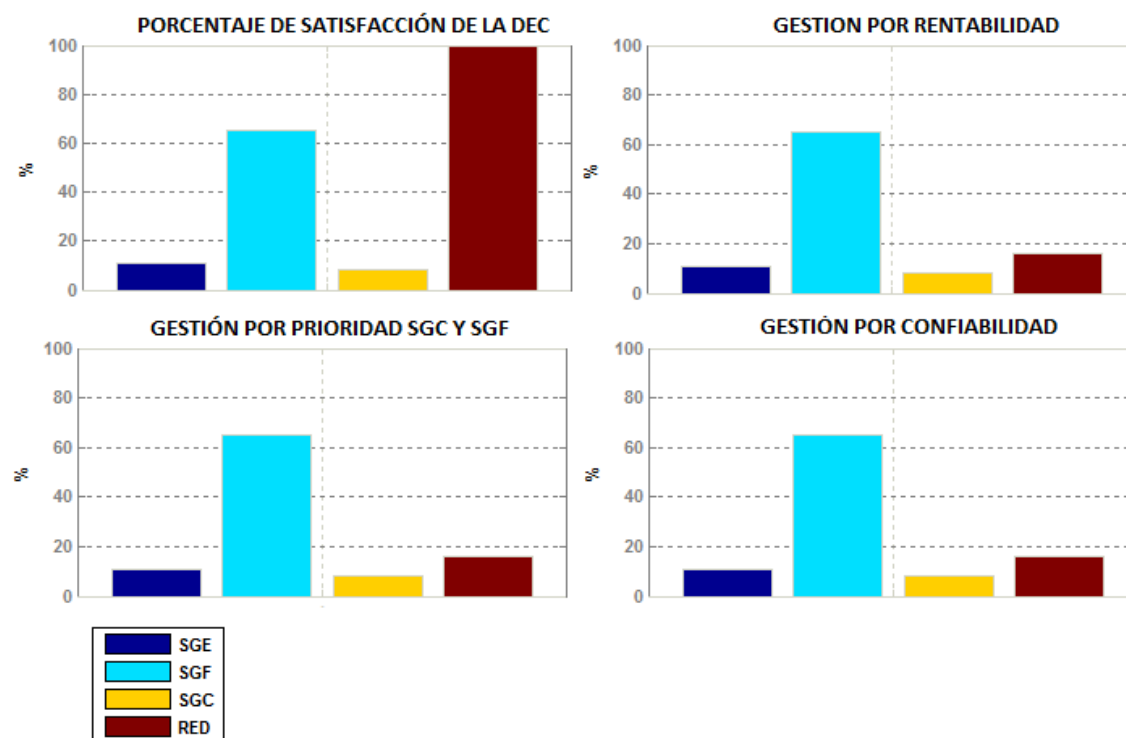
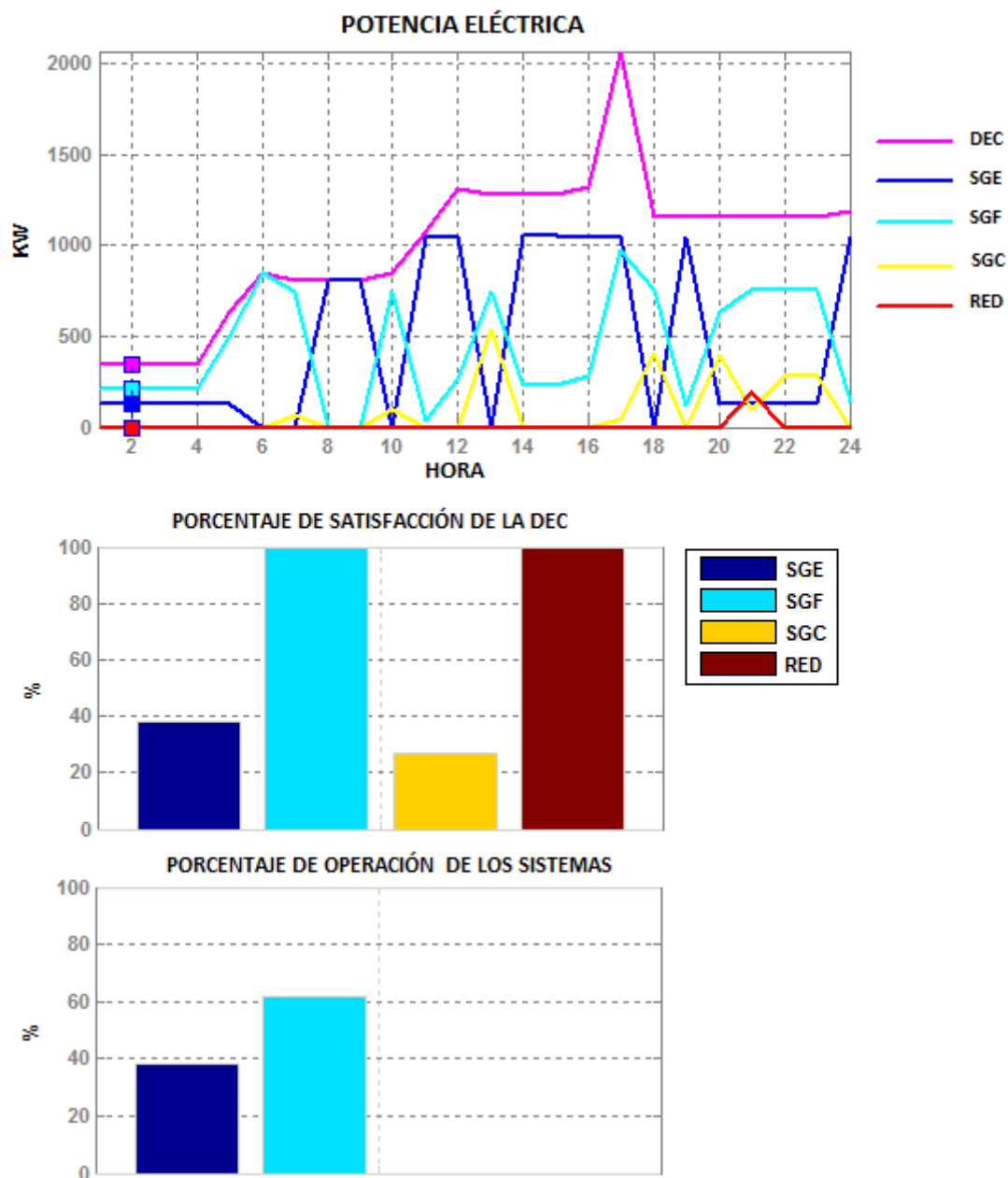
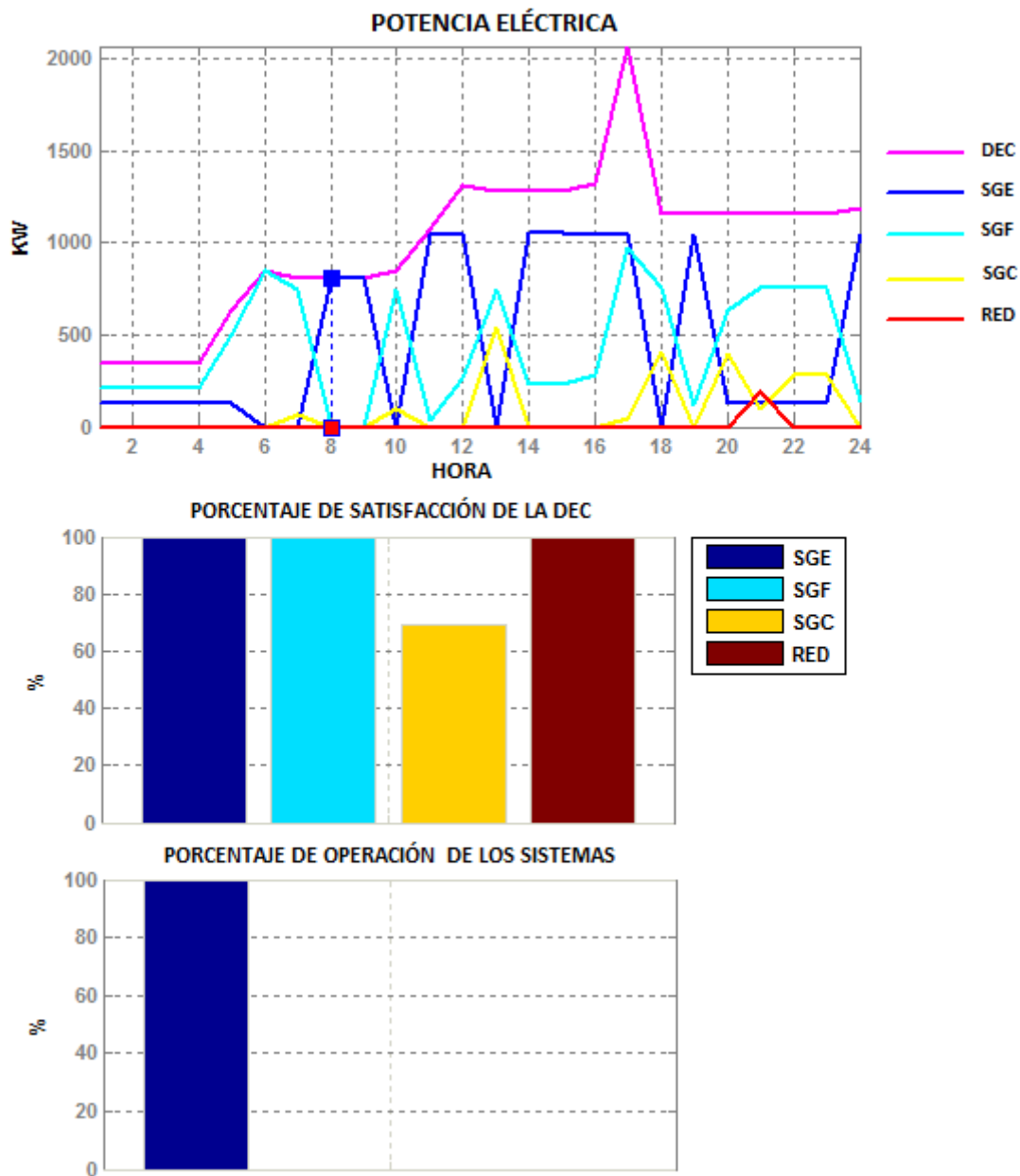


Figura 4.5. Comparación del GLD por criterio hora 21.



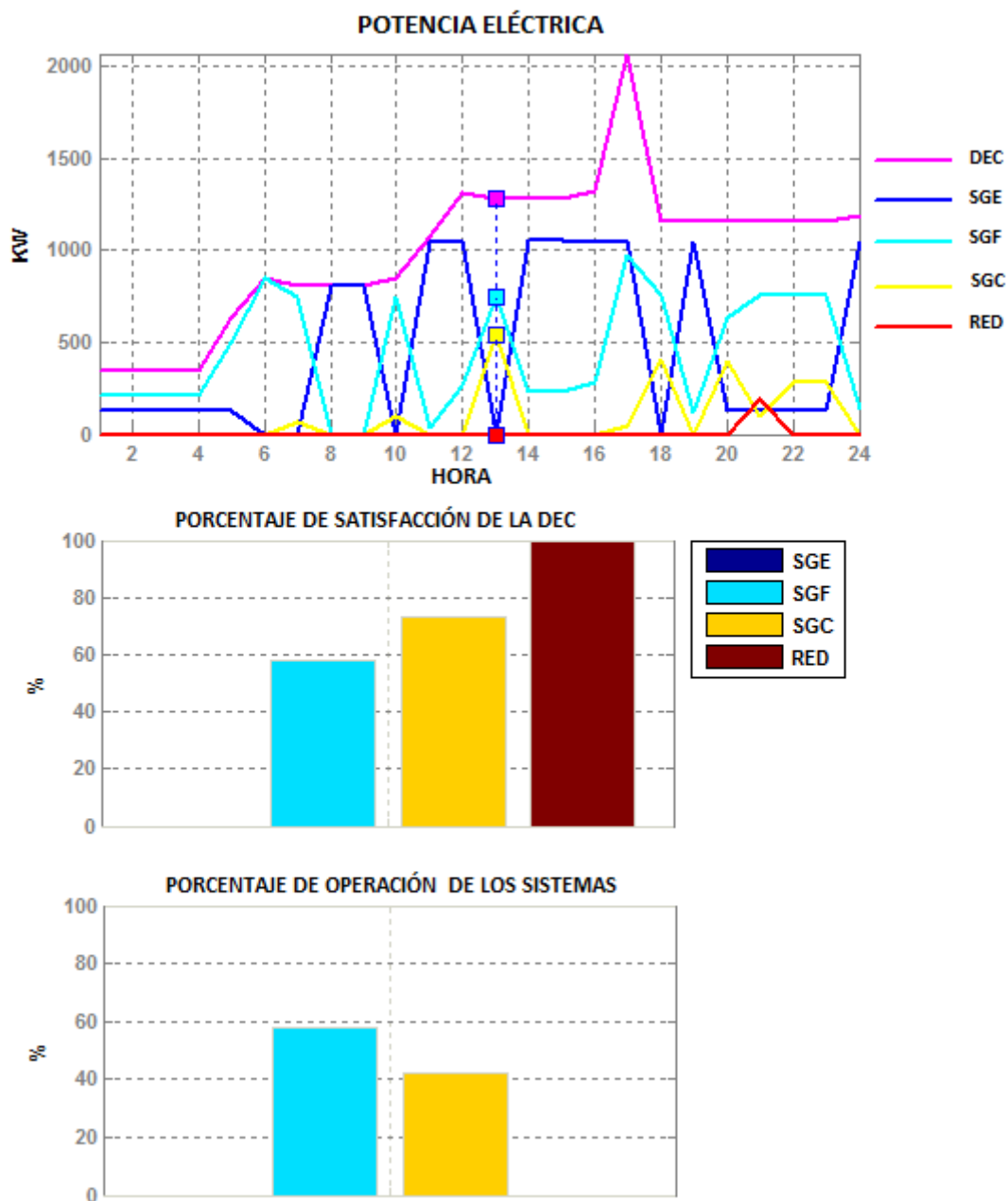
**Figura 4.6. Gestión por rentabilidad hora 2.**

Nótese que en la Figura 4.6 muestra el caso para cuando el viento es leve, la irradiación es equivalente a un día soleado (alta) y el nivel de hidrógeno es poco. El SGF podría satisfacer la demanda por si solo, sin embargo, el GLD está operando por criterio de rentabilidad en el que la prioridad la tiene el SGE seguido del SGF. Por tal razón toma todo lo que puede suplir el SGE y se complementa con el SGF. En este caso solo estos dos sistemas bastan para cumplir con la DEC.



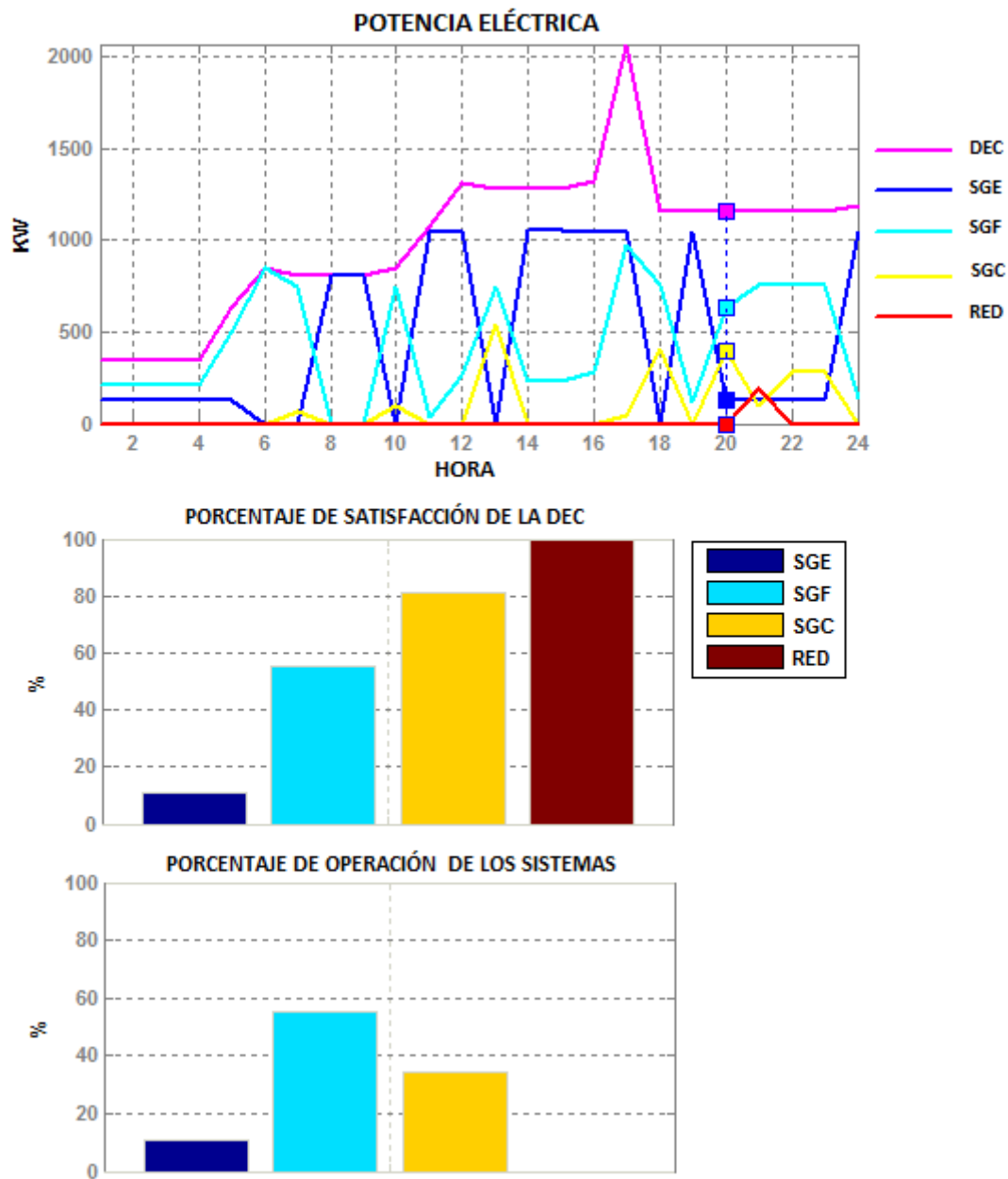
**Figura 4.7. Gestión por rentabilidad hora 8.**

En la Figura 4.7 muestra el caso para cuando el viento es fuerte, la irradiación es equivalente a un día soleado (alta) y el nivel de hidrógeno es medio. Se puede ver que aunque el sistema puede ser soportado por el SGF y el SGC, la gestión realizada por el GLD orienta el flujo de potencia solo por parte del SGE, esto incide en un ahorro de hidrógeno en el SGC, junto con la energía acumulada en el banco de baterías del SGF.



**Figura 4.8. Gestión por rentabilidad hora 13.**

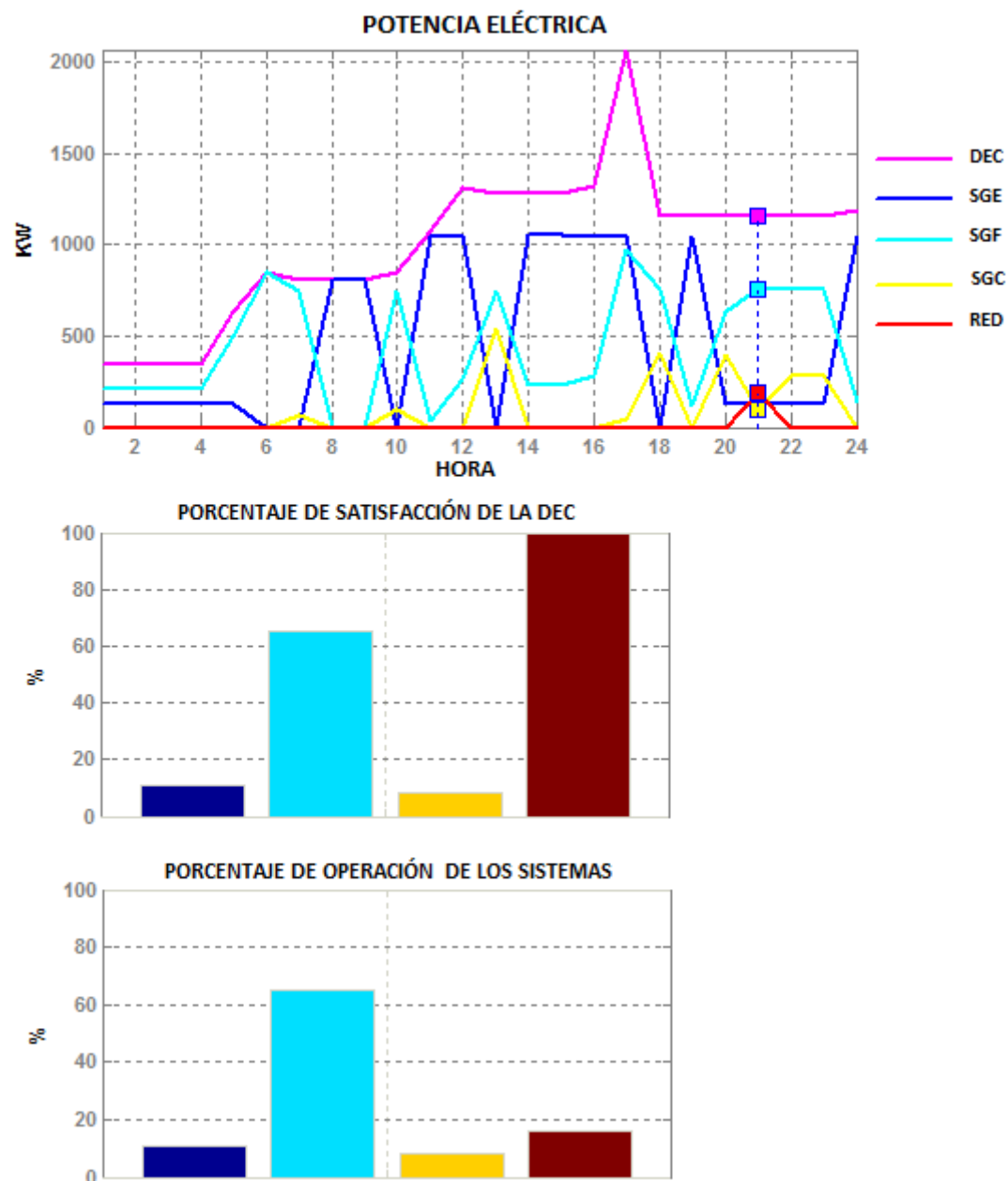
En la Figura 4.8 muestra el caso para cuando el viento es calmado, la irradiación es equivalente a un día nublado (media) y el nivel de hidrógeno es medio. La respuesta presentada indica que el SGE no es capaz de cumplir con la demanda y a pesar que la satisfacción de la demanda es mayor en el SGC que en el SGF, el GLD decide emplear la fuente menos costosa para el caso que es el SGF.



**Figura 4.9. Gestión por rentabilidad hora 20.**

En la Figura 4.9 muestra el caso para cuando el viento es suave, la irradiación es equivalente a un día nublado (media) y el nivel de hidrógeno es lleno. Se nota que el GDL toma todo lo que necesita del SGE y posteriormente lo que falta lo toma del SGF, para poder cumplir con la DEC en su totalidad se hace necesario complementar con el SGC.





**Figura 4.10. Gestión por rentabilidad hora 21.**

En la Figura 4.10 muestra el caso para cuando el viento es suave, la irradiación es equivalente a un día nublado (media) y el nivel de hidrógeno es poco. En este caso, es necesario que la red supla el déficit ya que el nivel de satisfacción de la DEC del conjunto de fuentes no es suficiente para cubrirla.

En las Figura 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15, se observan las gráficas para el escenario de confiabilidad en las horas del día seleccionadas (2, 8, 13, 20 y 21 horas). En estas se verifica que el GLD determina la prioridad de gestión de acuerdo a su porcentaje de satisfacción obtenido tomando la de mayor porcentaje como la prioritaria y teniendo como excepción la red que se asume como 100% y siempre será empleada en última instancia.

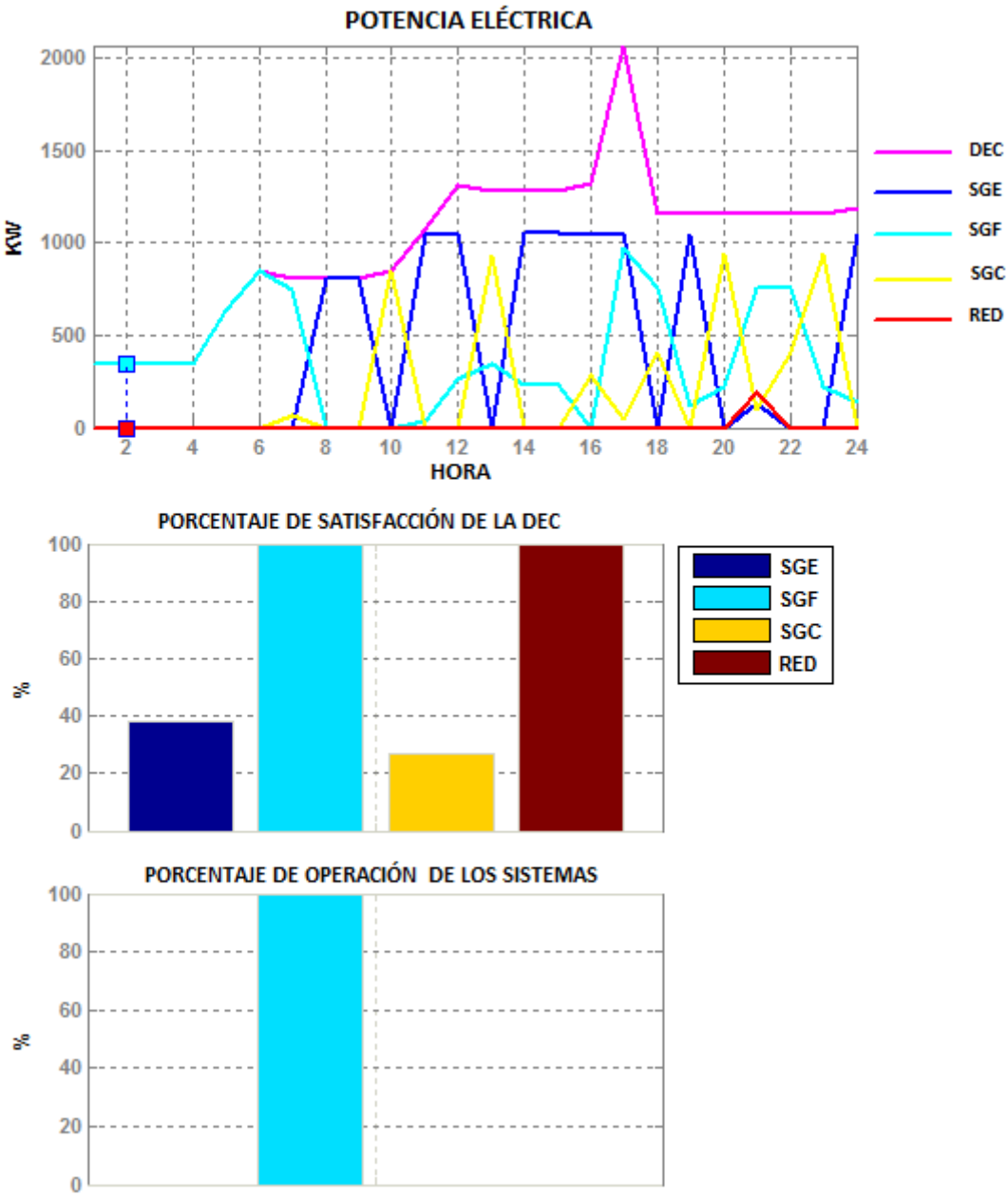


Figura 4.11. Gestión por confiabilidad hora 2.

En la Figura 4.11 muestra el caso para cuando el viento es leve, la irradiación es equivalente a un día soleado (alta) y el nivel de hidrógeno es poco. Se puede observar que la DEC puede ser cubierta por el SGF en su totalidad, razón por la cual se toma solo la potencia de este sistema.

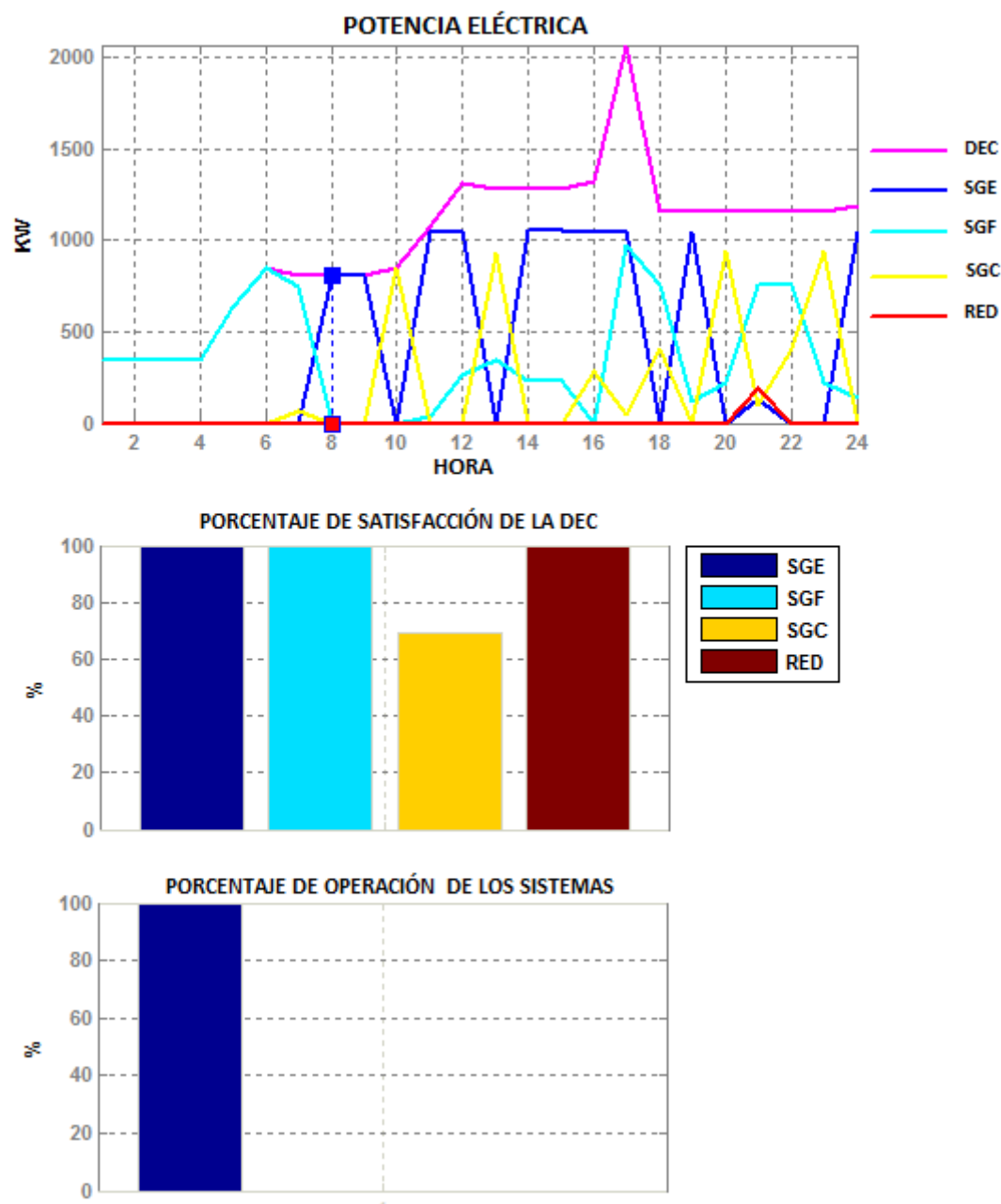
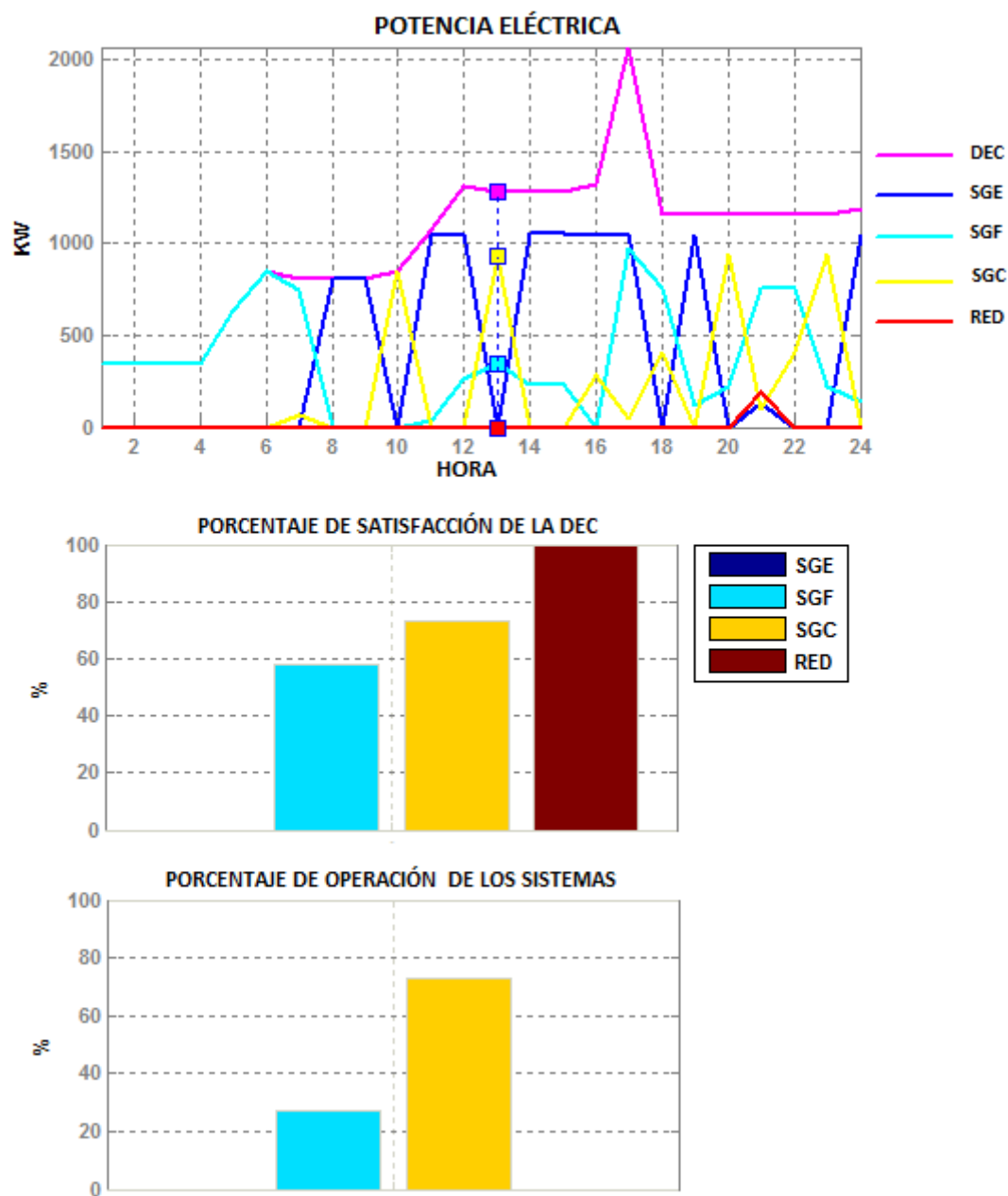


Figura 4.12. Gestión por confiabilidad hora 8.

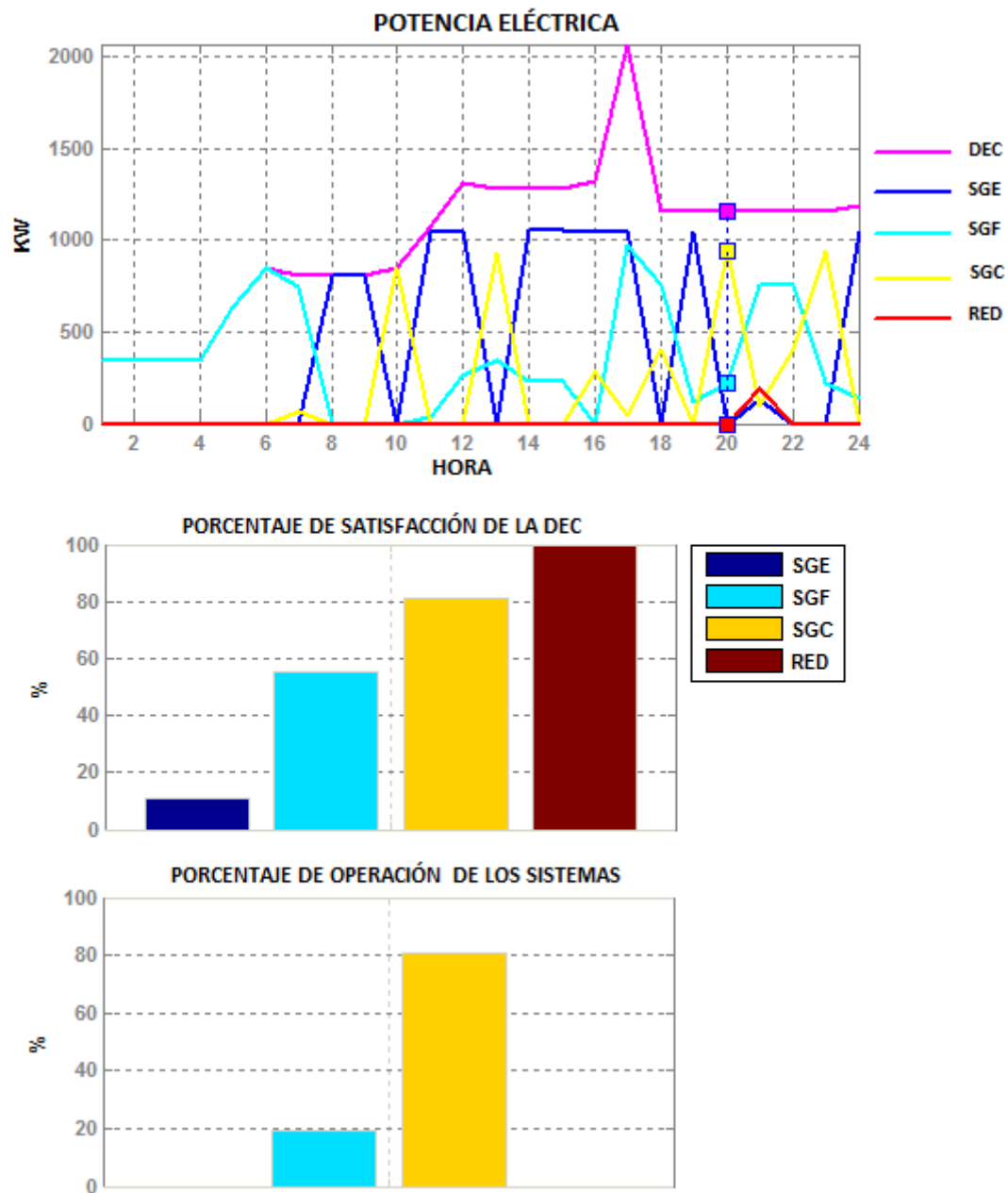
En la Figura 4.12 muestra el caso para cuando el viento es fuerte, la irradiación es equivalente a un día soleado y el nivel de hidrógeno es lleno. En este caso, es posible

ver que tanto el SGE y el SGF pueden cubrir la DEC por si solos y el GLD opta por la que es más rentable entre las confiables.



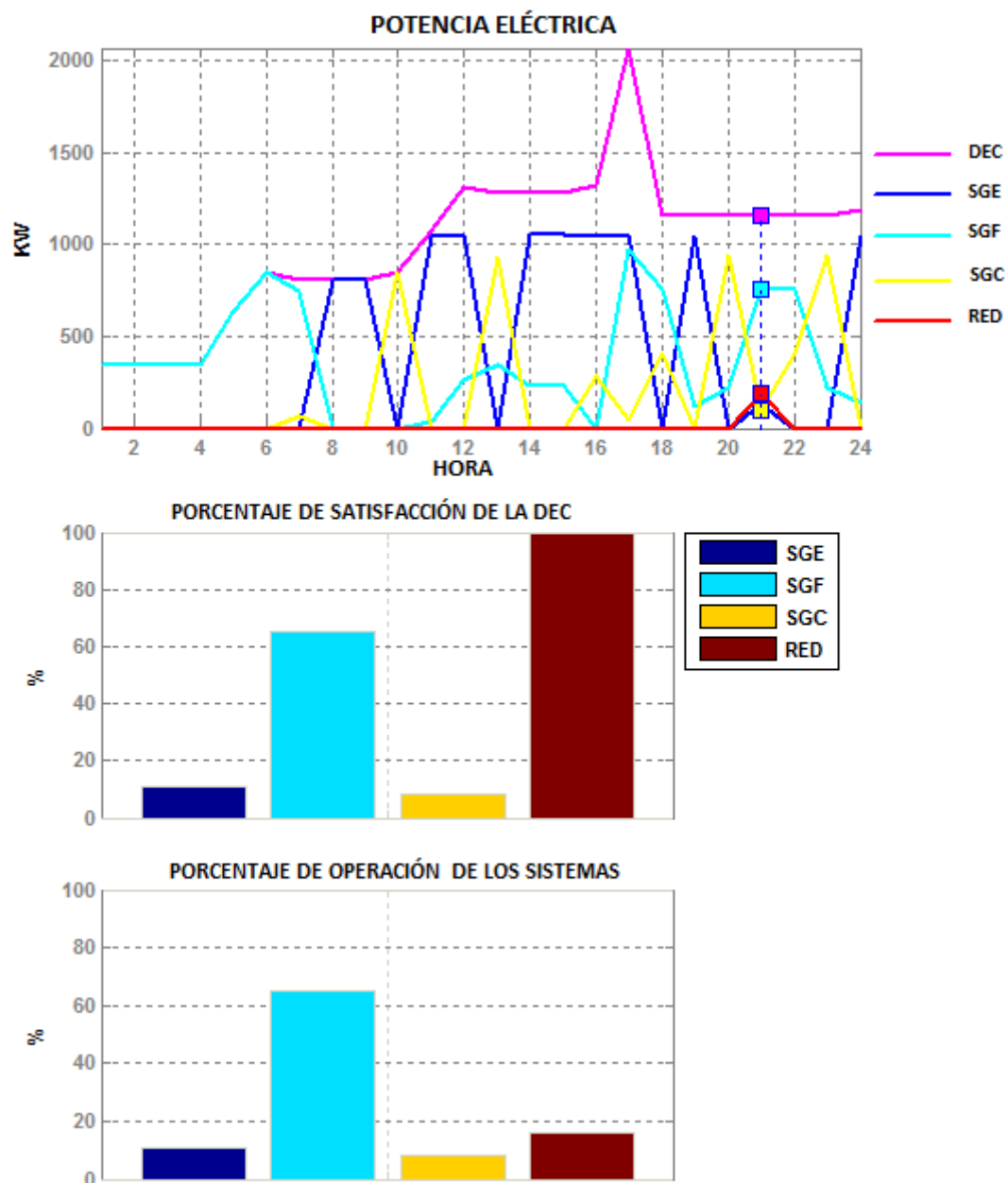
**Figura 4.13. Gestión por confiabilidad hora 13.**

En la Figura 4.13 muestra el caso para cuando el viento es calmado, la irradiación es equivalente a un día nublado (media) y el nivel de hidrógeno es lleno. Se puede apreciar que el SGC es el más confiable, por tal razón, se toma todo lo que puede suministrar este sistema y se complementa con el SGF.



**Figura 4.14. Gestión por confiabilidad hora 20.**

En la Figura 4.14 muestra el caso para cuando el viento es suave, la irradiación es equivalente a un día nublado y el nivel de hidrógeno es lleno. Este caso, ocurre lo presentado en el caso de la Figura 4.13 y se puede notar que a pesar que el SGE puede suministrar potencia, no es tan confiable como el SGF.



**Figura 4.15. Gestión por confiabilidad hora 21.**

En la Figura 4.15 muestra el caso para cuando el viento es suave, la irradiación es equivalente a un día nublado (media) y el nivel de hidrógeno es poco. Se muestra que el SGF es el más confiable, sin embargo, el conjunto no puede cubrir la DEC por lo cual la red es necesaria para cubrirla.

En las Figura 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 y 4.20, se observan las gráficas para el escenario de prioridad preestablecida en las horas del día seleccionadas (2, 8, 13, 20 y 21 horas). En este caso, se dio prioridad al SGC y en segunda instancia al SGF. En estas Figuras es posible verificar que el GLD emplea el recurso seleccionado como prioritario en la medida que sea posible.

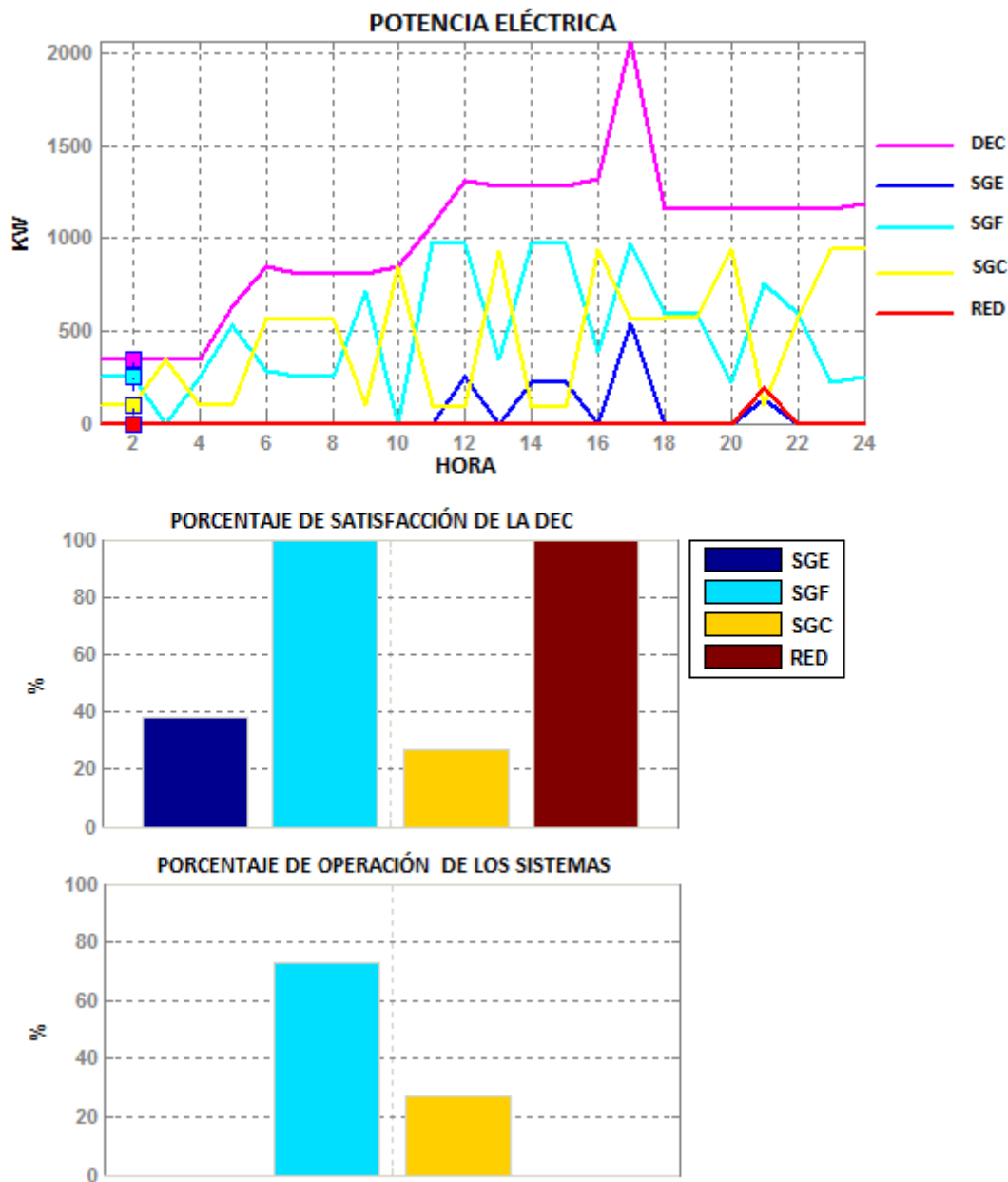
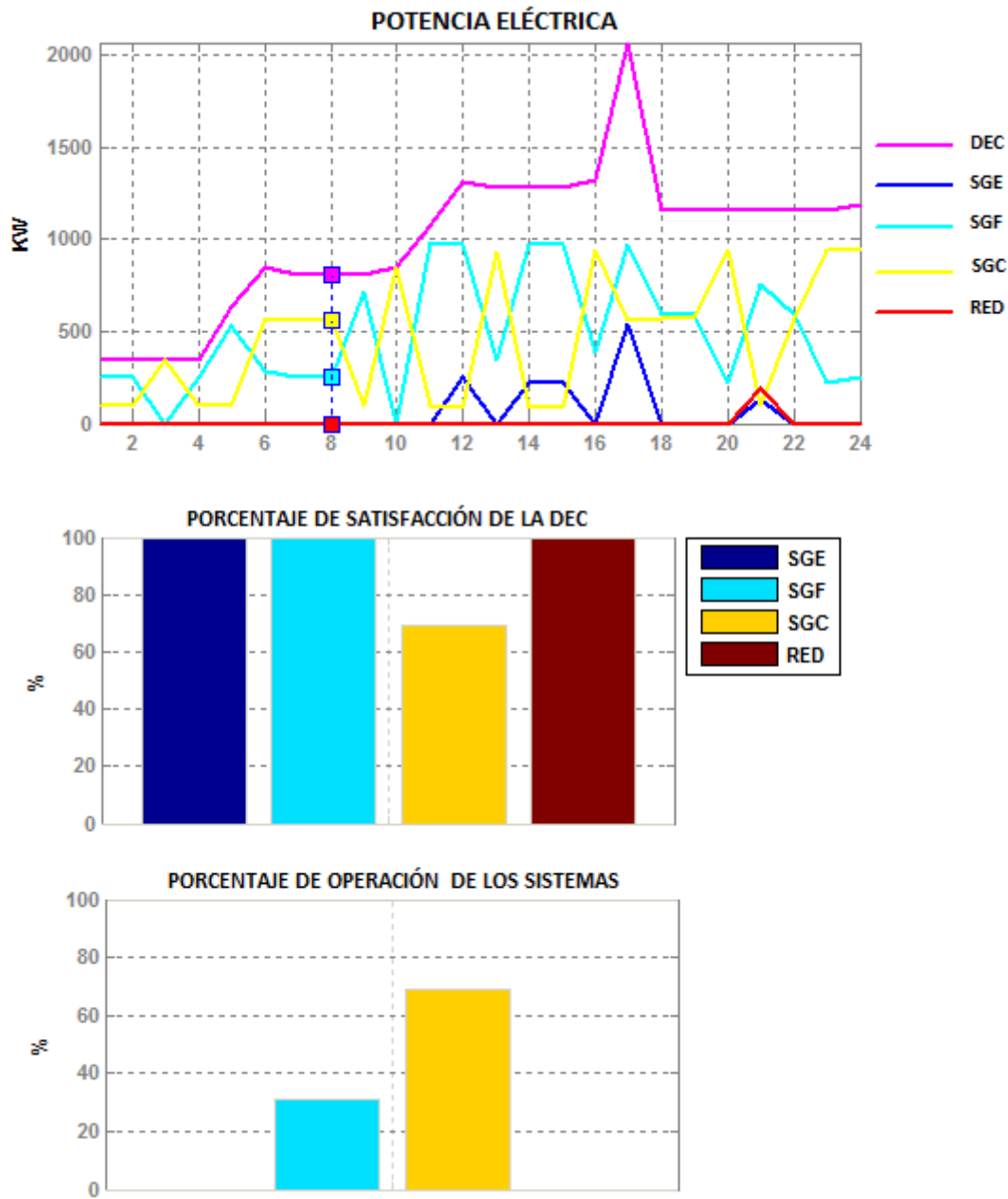


Figura 4.16. Gestión por prioridad SGC y SGF hora 2.

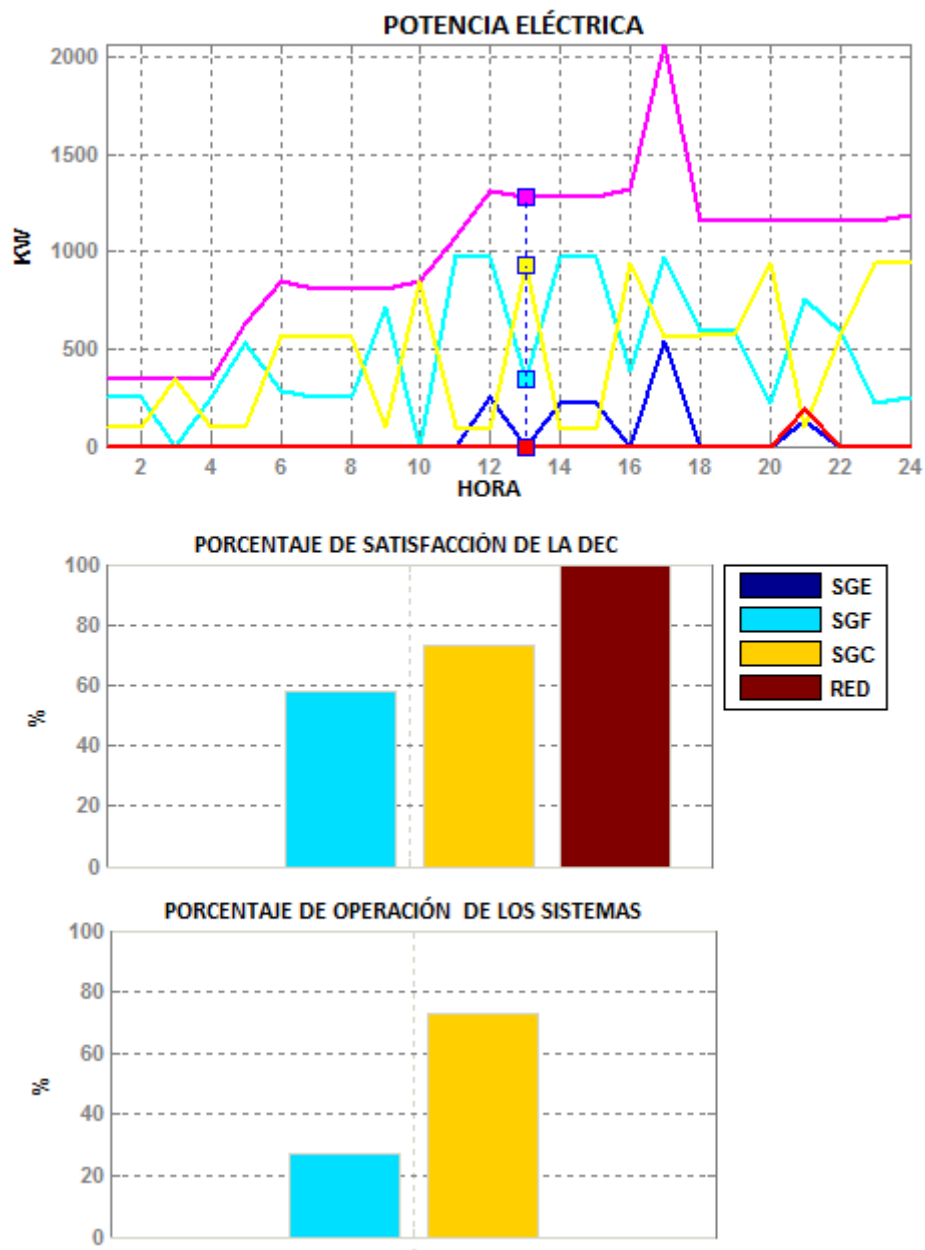
En la Figura 4.16 muestra el caso para cuando el viento es leve, la irradiación es equivalente a un día soleado (alta) y el nivel de hidrógeno es poco. En este caso, se toma la potencia disponible del SGC a pesar que el SGE tiene mayor satisfacción.



**Figura 4.17. Gestión por prioridad SGC y SGF hora 8.**

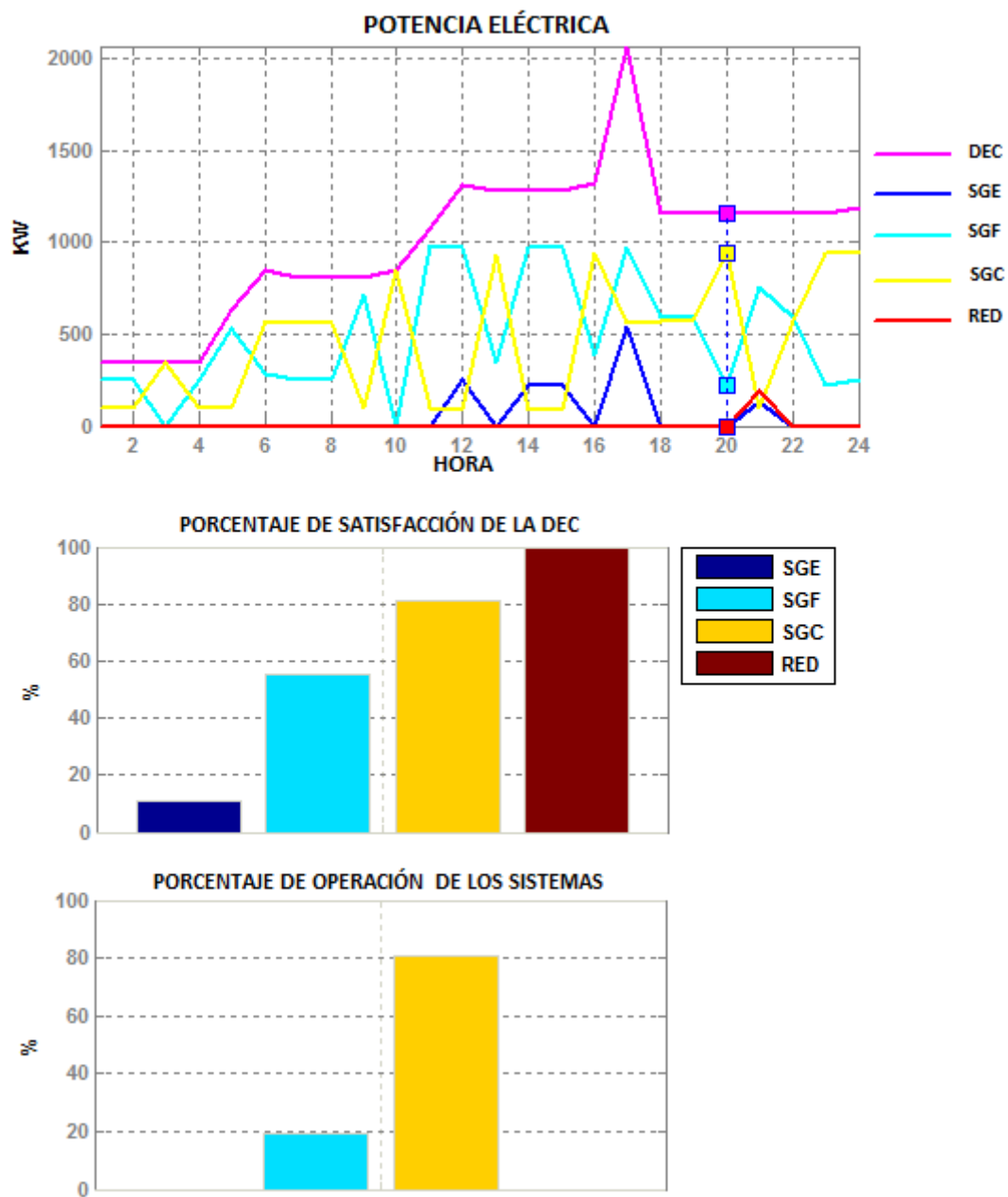
En la Figura 4.17 muestra el caso para cuando el viento es fuerte, la irradiación es equivalente a un día soleado (alta) y el nivel de hidrógeno es medio. Este caso, muestra que aunque la satisfacción de la DEC por parte de los sistemas SGE y SGF es total el GLD opta por tomar el orden de prioridad preestablecido.





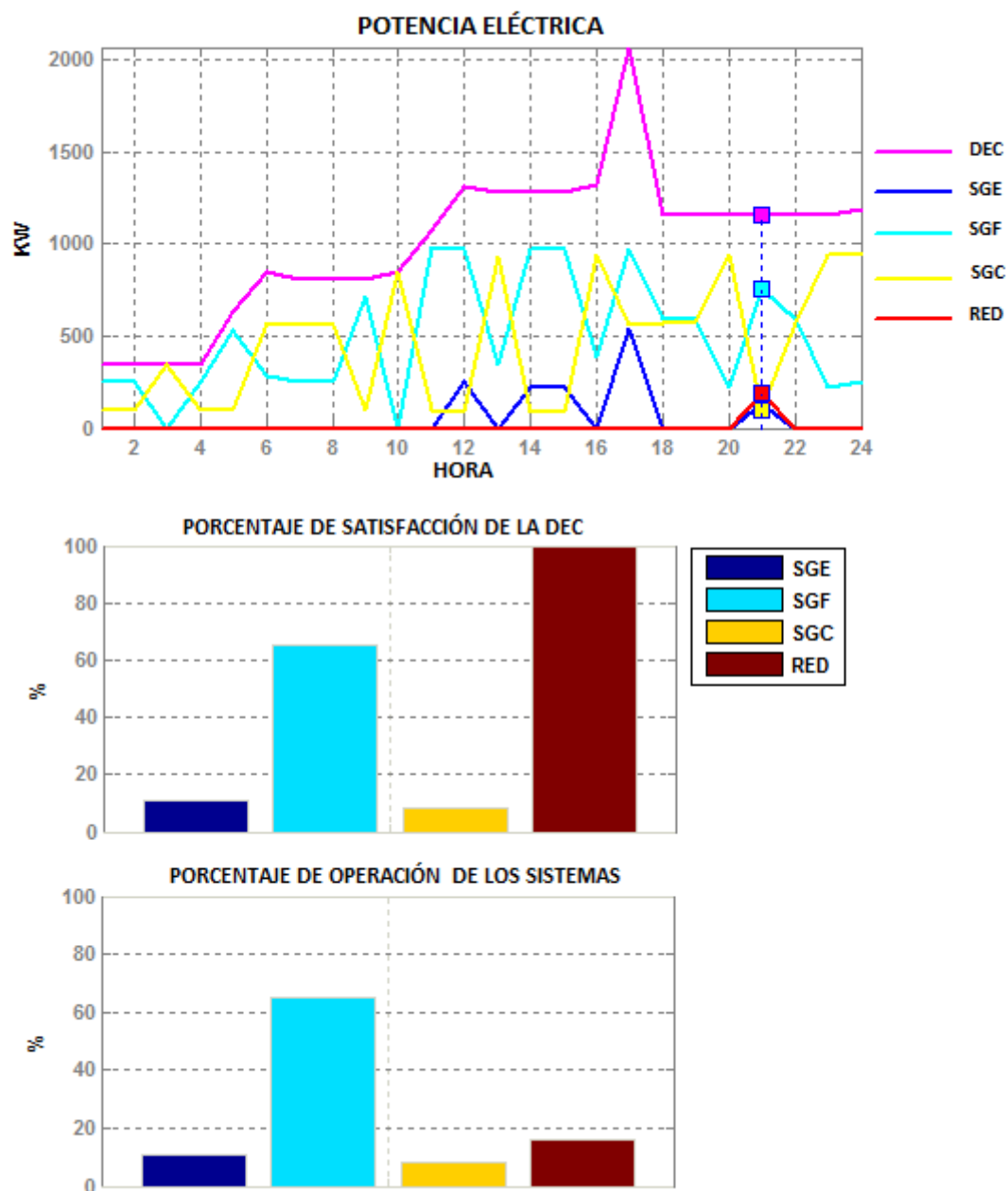
**Figura 4.18. Gestión por prioridad SGC y SGF hora 13.**

En la Figura 4.18 muestra el caso para cuando el viento es calmado, la irradiación es equivalente a un día lluvioso (baja) y el nivel de hidrógeno es medio. En este caso, se observa que el GLD guarda la prioridad preestablecida.



**Figura 4.19. Gestión por prioridad SGC y SGF hora 20.**

En la Figura 4.19 muestra el caso para cuando el viento es suave, la irradiación es equivalente a un día nublado (media) y el nivel de hidrógeno es lleno. Nuevamente se observa que el GLD guarda la prioridad preestablecida.



**Figura 4.20. Gestión por prioridad SGC y SGF hora 21.**

En la Figura 4.20 muestra el caso para cuando el viento es suave, la irradiación es equivalente a un día nublado (media) y el nivel de hidrógeno es poco. En este caso, se observa que el GLD guarda la prioridad preestablecida, pero el conjunto no es capaz de cumplir con la DEC, por tal razón, debe ser apoyado por la red.

#### 4.2. EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DEL GESTOR BASADO EN LÓGICA DIFUSA (GLD) ANTE DIFERENTES CURVAS DE DEMANDA Y CAPACIDADES DE LOS SUBSISTEMAS.

Para evaluar la respuesta del GLD ante diferentes tipos de demanda se seleccionaron tres curvas de demanda distintas a la observada en la Sección 4.1. Para este experimento se tomó como guía la Tabla 4.5, en la que se presentan los parámetros de estimación para la DEC y las potencias nominales de los subsistemas SGE, SGF y SGC.

CASO	DEMANDA			POTENCIA NOMINAL (KW)		
	TIPO	TEMPORADA	DIA	SGE	SGF	SGC
1	Residencial	Verano	Inicio de semana	1109	1100	940
2	Residencial	Verano	Inicio de semana	2774	1100	940
3	Residencial	Verano	Inicio de semana	1109	2100	940
4	Residencial	Verano	Inicio de semana	1109	1100	2350
5	Comercial	Invierno	Mitad de semana	1109	1100	940
6	Comercial	Invierno	Mitad de semana	2774	1100	940
7	Comercial	Invierno	Mitad de semana	1109	2100	940
8	Comercial	Invierno	Mitad de semana	1109	1100	2350
9	Industrial	Primavera	Fin de semana	1109	1100	940
10	Industrial	Primavera	Fin de semana	2774	1100	940
11	Industrial	Primavera	Fin de semana	1109	2100	940
12	Industrial	Primavera	Fin de semana	1109	1100	2350

**Tabla 4.5. Tabla de experimento para diferentes demandas y potencias de los subsistemas.**

En las Tablas 4.6 a 4.17 se muestran los experimentos realizados para cada uno de los casos mostrados en la Tabla 4.5. En estos se presentan la hora del día, la demanda estimada en KW para esa hora específica y las entradas difusas a los subsistemas (viento, irradiación y nivel de hidrógeno). Estas entradas difusas son seleccionadas de forma pseudo- aleatoria por el sistema implementado en el Capítulo 3.

En las tablas 4.18 a 4.29 se presentan los resultados de la respuesta del GLD para los casos de la Tabla 4.5. Estos presentan la satisfacción de la DEC obtenida para cada subsistema y la gestión calculada de cada subsistema para los escenarios de gestión de

rentabilidad y confiabilidad, junto con la potencia en KW aportada por cada subsistema para cumplir con la demanda.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
1	1	813	Suave	Media	Lleno
	2	813	Calmado	Nula	Lleno
	3	813	Leve	Media	Vacío
	4	813	Suave	Media	Poco
	5	903	Calmado	Media	Mucho
	6	1329	Suave	Media	Poco
	7	1283	Calmado	Media	Poco
	8	1283	Calmado	Media	Poco
	9	1283	Fuerte	Media	Mucho
	10	1329	Regular	Alta	Mucho
	11	2320	Regular	Baja	Poco
	12	1219	Calmado	Media	Mucho
	13	1162	Leve	Alta	Poco
	14	1162	Fuerte	Baja	Lleno
	15	1162	Leve	Alta	Mucho
	16	1189	Leve	Nula	Lleno
	17	1189	Regular	Alta	Vacío
	18	1162	Suave	Nula	Vacío
	19	1162	Fuerte	Baja	Poco
	20	1162	Suave	Alta	Lleno
	21	1162	Regular	Nula	Lleno
	22	1162	Fuerte	Baja	Lleno
	23	1162	Fuerte	Nula	Vacío
	24	1189	Suave	Media	Vacío

**Tabla 4.6. Experimento caso 1.**

En el caso 1 se tiene una demanda de tipo residencial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando todos estos manejan una potencia nominal similar, esto con el fin de analizar el comportamiento del GLD ante este tipo de evento.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
2	1	813	Suave	Media	Lleno
	2	813	Calmado	Nula	Lleno
	3	813	Leve	Media	Vacío
	4	813	Suave	Media	Poco
	5	903	Calmado	Media	Mucho
	6	1329	Suave	Media	Poco
	7	1283	Calmado	Media	Poco
	8	1283	Calmado	Media	Poco
	9	1283	Fuerte	Media	Mucho
	10	1329	Regular	Alta	Mucho
	11	2320	Regular	Baja	Poco
	12	1219	Calmado	Media	Mucho
	13	1162	Leve	Alta	Poco
	14	1162	Fuerte	Baja	Lleno
	15	1162	Leve	Alta	Mucho
	16	1189	Leve	Nula	Lleno
	17	1189	Regular	Alta	Vacío
	18	1162	Suave	Nula	Vacío
	19	1162	Fuerte	Baja	Poco
	20	1162	Suave	Alta	Lleno
	21	1162	Regular	Nula	Lleno
	22	1162	Fuerte	Baja	Lleno
	23	1162	Fuerte	Nula	Vacío
	24	1189	Suave	Media	Vacío

**Tabla 4.7. Experimento caso 2.**

En el caso 2 se tiene una demanda de tipo residencial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGE maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
3	1	813	Regular	Alta	Mucho
	2	813	Calmado	Baja	Mucho
	3	813	Calmado	Baja	Vacío
	4	813	Moderado	Nula	Poco
	5	903	Fuerte	Nula	Vacío
	6	1329	Fuerte	Media	Vacío
	7	1283	Suave	Alta	Mucho
	8	1283	Regular	Nula	Vacío
	9	1283	Moderado	Nula	Lleno
	10	1329	Moderado	Nula	Poco
	11	2320	Leve	Baja	Poco
	12	1219	Moderado	Nula	Lleno
	13	1162	Fuerte	Alta	Lleno
	14	1162	Moderado	Nula	Lleno
	15	1162	Fuerte	Media	Lleno
	16	1189	Fuerte	Baja	Poco
	17	1189	Leve	Media	Vacío
	18	1162	Fuerte	Media	Mucho
	19	1162	Fuerte	Baja	Mucho
	20	1162	Suave	Alta	Lleno
	21	1162	Leve	Alta	Poco
	22	1162	Moderado	Nula	Poco
	23	1162	Moderado	Media	Vacío
	24	1189	Suave	Alta	Mucho

**Tabla 4.8. Experimento caso 3.**

En el caso 3 se tiene una demanda de tipo residencial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGF maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
4	1	813	Suave	Alta	Lleno
	2	813	Moderado	Media	Poco
	3	813	Suave	Media	Mucho
	4	813	Calmado	Baja	Lleno
	5	903	Fuerte	Alta	Vacío
	6	1329	Regular	Baja	Vacío
	7	1283	Moderado	Nula	Poco
	8	1283	Moderado	Media	Lleno
	9	1283	Fuerte	Media	Poco
	10	1329	Fuerte	Media	Vacío
	11	2320	Suave	Media	Mucho
	12	1219	Regular	Media	Mucho
	13	1162	Regular	Nula	Vacío
	14	1162	Fuerte	Alta	Poco
	15	1162	Moderado	Media	Mucho
	16	1189	Leve	Alta	Poco
	17	1189	Calmado	Media	Vacío
	18	1162	Fuerte	Baja	Vacío
	19	1162	Suave	Nula	Vacío
	20	1162	Fuerte	Baja	Poco
	21	1162	Fuerte	Nula	Mucho
	22	1162	Fuerte	Alta	Vacío
	23	1162	Leve	Alta	Lleno
	24	1189	Regular	Nula	Lleno

**Tabla 4.9. Experimento caso 4.**

En el caso 3 se tiene una demanda de tipo residencial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGC maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.



CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
5	1	285	Leve	Nula	Mucho
	2	285	Calmando	Alta	Poco
	3	285	Moderado	Nula	Lleno
	4	285	Moderado	Baja	Mucho
	5	1555	Moderado	Nula	Mucho
	6	4292	Calmando	Nula	Poco
	7	4365	Moderado	Nula	Lleno
	8	4396	Regular	Media	Mucho
	9	4362	Regular	Nula	Poco
	10	4292	Leve	Media	Lleno
	11	3165	Fuerte	Baja	Vacío
	12	2060	Fuerte	Alta	Lleno
	13	1938	Regular	Nula	Lleno
	14	1896	Fuerte	Media	Mucho
	15	1938	Suave	Media	Lleno
	16	2023	Moderado	Nula	Mucho
	17	2563	Regular	Nula	Poco
	18	1156	Moderado	Alta	Lleno
	19	1156	Fuerte	Baja	Vacío
	20	1156	Moderado	Alta	Poco
	21	1156	Calmando	Nula	Poco
	22	1156	Suave	Alta	Poco
	23	1156	Fuerte	Media	Poco
	24	1326	Moderado	Alta	Mucho

**Tabla 4.10. Experimento caso 5.**

En el caso 5 se tiene una demanda de tipo comercial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando todos estos manejan una potencia nominal similar.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
6	1	285	Regular	Alta	Mucho
	2	285	Calmado	Baja	Mucho
	3	285	Calmado	Baja	Vacío
	4	285	Moderado	Nula	Poco
	5	1555	Fuerte	Nula	Vacío
	6	4292	Fuerte	Media	Vacío
	7	4365	Suave	Alta	Mucho
	8	4396	Regular	Nula	Vacío
	9	4362	Moderado	Nula	Lleno
	10	4292	Moderado	Nula	Poco
	11	3165	Leve	Baja	Poco
	12	2060	Moderado	Nula	Lleno
	13	1938	Fuerte	Alta	Lleno
	14	1896	Moderado	Nula	Lleno
	15	1938	Fuerte	Media	Lleno
	16	2023	Fuerte	Baja	Poco
	17	2563	Leve	Media	Vacío
	18	1156	Fuerte	Media	Mucho
	19	1156	Fuerte	Baja	Mucho
	20	1156	Suave	Alta	Lleno
	21	1156	Leve	Alta	Poco
	22	1156	Moderado	Nula	Poco
	23	1156	Moderado	Media	Vacío
	24	1326	Suave	Alta	Mucho

**Tabla 4.11. Experimento caso 6.**

En el caso 6 se tiene una demanda de tipo comercial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGE maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
7	1	285	Leve	Baja	Poco
	2	285	Calmando	Media	Poco
	3	285	Calmando	Baja	Vacío
	4	285	Leve	Alta	Poco
	5	1555	Moderado	Baja	Vacío
	6	4292	Suave	Nula	Poco
	7	4365	Calmando	Baja	Mucho
	8	4396	Suave	Media	Vacío
	9	4362	Regular	Media	Poco
	10	4292	Fuerte	Nula	Mucho
	11	3165	Moderado	Baja	Lleno
	12	2060	Calmando	Media	Vacío
	13	1938	Calmando	Nula	Poco
	14	1896	Calmando	Media	Mucho
	15	1938	Fuerte	Alta	Vacío
	16	2023	Leve	Nula	Mucho
	17	2563	Regular	Alta	Lleno
	18	1156	Moderado	Nula	Mucho
	19	1156	Moderado	Media	Vacío
	20	1156	Fuerte	Nula	Poco
	21	1156	Calmando	Baja	Vacío
	22	1156	Calmando	Alta	Mucho
	23	1156	Fuerte	Nula	Mucho
	24	1326	Suave	Nula	Poco

**Tabla 4.12. Experimento caso 7.**

En el caso 7 se tiene una demanda de tipo comercial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGF maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
8	1	285	Suave	Media	Lleno
	2	285	Suave	Baja	Vacío
	3	285	Calmado	Baja	Lleno
	4	285	Moderado	Alta	Vacío
	5	1555	Regular	Alta	Mucho
	6	4292	Calmado	Baja	Poco
	7	4365	Suave	Nula	Vacío
	8	4396	Regular	Alta	Mucho
	9	4362	Calmado	Nula	Vacío
	10	4292	Leve	Alta	Vacío
	11	3165	Leve	Media	Lleno
	12	2060	Suave	Media	Poco
	13	1938	Moderado	Alta	Lleno
	14	1896	Fuerte	Nula	Lleno
	15	1938	Regular	Nula	Vacío
	16	2023	Moderado	Nula	Poco
	17	2563	Fuerte	Media	Lleno
	18	1156	Regular	Media	Vacío
	19	1156	Leve	Alta	Vacío
	20	1156	Calmado	Media	Poco
	21	1156	Suave	Nula	Lleno
	22	1156	Leve	Media	Mucho
	23	1156	Calmado	Nula	Poco
	24	1326	Regular	Alta	Poco

**Tabla 4.13. Experimento caso 8.**

En el caso 8 se tiene una demanda de tipo comercial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGC maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
9	1	1896	Suave	Nula	Mucho
	2	1896	Suave	Alta	Vacío
	3	1896	Fuerte	Baja	Lleno
	4	1896	Regular	Media	Poco
	5	3490	Fuerte	Media	Lleno
	6	4658	Moderado	Baja	Vacío
	7	4748	Moderado	Media	Mucho
	8	4785	Moderado	Alta	Mucho
	9	4743	Moderado	Baja	Mucho
	10	4657	Calmado	Alta	Lleno
	11	4546	Fuerte	Baja	Mucho
	12	4660	Moderado	Media	Lleno
	13	4746	Leve	Alta	Poco
	14	4786	Leve	Baja	Mucho
	15	4746	Calmado	Alta	Vacío
	16	4660	Leve	Media	Vacío
	17	3547	Fuerte	Nula	Vacío
	18	1896	Moderado	Baja	Poco
	19	1896	Regular	Nula	Poco
	20	1896	Moderado	Nula	Lleno
	21	1896	Leve	Nula	Lleno
	22	1896	Leve	Alta	Lleno
	23	1896	Moderado	Baja	Vacío
	24	2023	Calmado	Media	Poco

**Tabla 4.14. Experimento caso 9.**

En el caso 9 se tiene una demanda de tipo industrial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando todos estos manejan una potencia nominal similar.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
10	1	1896	Moderado	Alta	Poco
	2	1896	Calmado	Media	Poco
	3	1896	Suave	Baja	Mucho
	4	1896	Regular	Media	Lleno
	5	3490	Fuerte	Alta	Poco
	6	4658	Calmado	Baja	Vacío
	7	4748	Suave	Nula	Poco
	8	4785	Leve	Baja	Vacío
	9	4743	Regular	Alta	Mucho
	10	4657	Leve	Alta	Mucho
	11	4546	Calmado	Media	Mucho
	12	4660	Regular	Media	Mucho
	13	4746	Moderado	Baja	Poco
	14	4786	Moderado	Alta	Mucho
	15	4746	Leve	Nula	Vacío
	16	4660	Suave	Alta	Poco
	17	3547	Calmado	Baja	Poco
	18	1896	Regular	Alta	Lleno
	19	1896	Regular	Media	Vacío
	20	1896	Regular	Nula	Lleno
	21	1896	Calmado	Nula	Mucho
	22	1896	Leve	Baja	Mucho
	23	1896	Fuerte	Baja	Lleno
	24	2023	Regular	Nula	Vacío

**Tabla 4.15. Experimento caso 10.**

En el caso 10 se tiene una demanda de tipo industrial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGE maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
11	1	1896	Suave	Baja	Mucho
	2	1896	Regular	Media	Lleno
	3	1896	Leve	Media	Lleno
	4	1896	Regular	Nula	Lleno
	5	3490	Regular	Alta	Vacío
	6	4658	Fuerte	Baja	Mucho
	7	4748	Regular	Alta	Vacío
	8	4785	Calmado	Nula	Poco
	9	4743	Calmado	Media	Vacío
	10	4657	Fuerte	Nula	Poco
	11	4546	Suave	Media	Mucho
	12	4660	Moderado	Nula	Lleno
	13	4746	Leve	Alta	Mucho
	14	4786	Calmado	Media	Lleno
	15	4746	Fuerte	Alta	Vacío
	16	4660	Suave	Baja	Vacío
	17	3547	Fuerte	Baja	Mucho
	18	1896	Leve	Nula	Poco
	19	1896	Leve	Nula	Vacío
	20	1896	Regular	Baja	Lleno
	21	1896	Calmado	Alta	Poco
	22	1896	Leve	Baja	Poco
	23	1896	Calmado	Alta	Mucho
	24	2023	Moderado	Baja	Lleno

**Tabla 4.16. Experimento caso 11.**

En el caso 11 se tiene una demanda de tipo industrial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGF maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.

CASO	HORA	DEMANDA (KW)	ENTRADAS DIFUSAS		
			VIENTO	IRRADIACION	NIVEL H
12	1	1896	Regular	Alta	Vacío
	2	1896	Calmado	Alta	Poco
	3	1896	Leve	Nula	Poco
	4	1896	Calmado	Baja	Poco
	5	3490	Leve	Media	Lleno
	6	4658	Leve	Baja	Vacío
	7	4748	Moderado	Nula	Vacío
	8	4785	Fuerte	Alta	Lleno
	9	4743	Leve	Alta	Mucho
	10	4657	Suave	Alta	Poco
	11	4546	Moderado	Alta	Lleno
	12	4660	Leve	Alta	Lleno
	13	4746	Suave	Media	Mucho
	14	4786	Moderado	Media	Lleno
	15	4746	Leve	Baja	Mucho
	16	4660	Suave	Alta	Lleno
	17	3547	Suave	Alta	Mucho
	18	1896	Calmado	Alta	Poco
	19	1896	Calmado	Media	Lleno
	20	1896	Suave	Nula	Mucho
	21	1896	Suave	Baja	Lleno
	22	1896	Moderado	Baja	Mucho
	23	1896	Moderado	Nula	Lleno
	24	2023	Calmado	Baja	Mucho

**Tabla 4.17. Experimento caso 12.**

En el caso 12 se tiene una demanda de tipo industrial que se desea suplir gestionando la potencia de los subsistemas SGE, SGF y SGC cuando el SGC maneja una mayor potencia nominal que los otros subsistemas.



CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
1	1	2%	100%	100%	2%	98%	0%	0%	16	797	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	2	0%	100%	100%	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	3	11%	100%	6%	11%	89%	0%	0%	89	724	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	4	2%	100%	35%	2%	98%	0%	0%	16	797	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	5	0%	96%	62%	0%	96%	4%	0%	0	867	36	0	0%	96%	4%	0%	0	867	36	0
	6	1%	65%	21%	1%	65%	21%	13%	13	864	279	173	1%	65%	21%	13%	13	864	279	173
	7	0%	67%	22%	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141
	8	0%	67%	22%	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141
	9	100%	67%	44%	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0
	10	100%	74%	42%	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0
	11	100%	32%	12%	100%	0%	0%	0%	2320	0	0	0	100%	0%	0%	0%	2320	0	0	0
	12	0%	71%	46%	0%	71%	29%	0%	0	866	354	0	0%	71%	29%	0%	0	866	354	0
	13	7%	84%	24%	7%	84%	9%	0%	81	976	105	0	0%	84%	16%	0%	0	976	186	0
	14	100%	65%	81%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	15	7%	84%	49%	7%	84%	9%	0%	81	976	105	0	0%	84%	16%	0%	0	976	186	0
	16	7%	100%	79%	7%	93%	0%	0%	83	1106	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1189	0	0
	17	100%	82%	4%	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0
	18	2%	100%	4%	2%	98%	0%	0%	23	1139	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	19	100%	65%	24%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	20	2%	84%	81%	2%	84%	14%	0%	23	976	163	0	0%	84%	16%	0%	0	976	186	0
	21	100%	100%	81%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	22	100%	65%	81%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	23	100%	100%	4%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	24	2%	73%	4%	2%	73%	4%	21%	24	868	48	250	2%	73%	4%	21%	24	868	48	250

**Tabla 4.18. Resultados caso 1.**

En la Tabla 4.18 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 1.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
2	1	6%	100%	100%	6%	94%	0%	0%	49	764	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	2	0%	100%	100%	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	3	26%	100%	6%	26%	74%	0%	0%	211	602	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	4	6%	100%	35%	6%	94%	0%	0%	49	764	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	5	0%	96%	62%	0%	96%	4%	0%	0	867	36	0	0%	96%	4%	0%	0	867	36	0
	6	3%	65%	21%	3%	65%	21%	11%	40	864	279	146	3%	65%	21%	11%	40	864	279	146
	7	0%	67%	22%	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141
	8	0%	67%	22%	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141	0%	67%	22%	11%	0	860	282	141
	9	100%	67%	44%	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0
	10	100%	74%	42%	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0
	11	100%	32%	12%	100%	0%	0%	0%	2320	0	0	0	100%	0%	0%	0%	2320	0	0	0
	12	0%	71%	46%	0%	71%	29%	0%	0	866	354	0	0%	71%	29%	0%	0	866	354	0
	13	18%	84%	24%	18%	82%	0%	0%	209	953	0	0	0%	84%	16%	0%	0	976	186	0
	14	100%	65%	81%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	15	18%	84%	49%	18%	82%	0%	0%	209	953	0	0	0%	84%	16%	0%	0	976	186	0
	16	18%	100%	79%	18%	82%	0%	0%	214	975	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1189	0	0
	17	100%	82%	4%	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0
	18	4%	100%	4%	4%	96%	0%	0%	46	1116	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	19	100%	65%	24%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	20	4%	84%	81%	4%	84%	12%	0%	46	976	139	0	0%	84%	16%	0%	0	976	186	0
	21	100%	100%	81%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	22	100%	65%	81%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	23	100%	100%	4%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	24	4%	73%	4%	4%	73%	4%	19%	48	868	48	226	4%	73%	4%	19%	48	868	48	226

**Tabla 4.19. Resultados caso 2.**

En la Tabla 4.19 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 2.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
3	1	100%	100%	78%	100%	0%	0%	0%	813	0	0	0	100%	0%	0%	0%	813	0	0	0
	2	0%	100%	78%	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	3	0%	100%	6%	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	4	94%	100%	39%	94%	6%	0%	0%	764	49	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	5	100%	100%	5%	100%	0%	0%	0%	903	0	0	0	100%	0%	0%	0%	903	0	0	0
	6	100%	100%	4%	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0
	7	2%	100%	47%	2%	98%	0%	0%	26	1257	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1283	0	0
	8	100%	100%	4%	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0
	9	56%	100%	77%	56%	44%	0%	0%	719	565	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1283	0	0
	10	51%	100%	21%	51%	49%	0%	0%	678	651	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1329	0	0
	11	4%	46%	12%	4%	46%	12%	38%	93	1067	278	882	4%	46%	12%	38%	93	1067	278	882
	12	56%	100%	77%	56%	44%	0%	0%	683	536	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1219	0	0
	13	100%	100%	84%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	14	63%	100%	86%	63%	37%	0%	0%	732	430	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	15	100%	100%	84%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	16	100%	89%	24%	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0
	17	7%	100%	4%	7%	93%	0%	0%	83	1106	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1189	0	0
	18	100%	100%	52%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	19	100%	97%	52%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	20	2%	100%	86%	2%	98%	0%	0%	23	1139	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	21	8%	100%	26%	8%	92%	0%	0%	93	1069	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	22	63%	100%	26%	63%	37%	0%	0%	732	430	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	23	63%	100%	4%	63%	37%	0%	0%	732	430	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	24	2%	100%	47%	2%	98%	0%	0%	24	1165	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1189	0	0

**Tabla 4.20. Resultados caso 3.**

En la Tabla 4.20 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 3.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
4	1	3%	100%	100%	3%	97%	0%	0%	24	789	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	2	94%	100%	97%	94%	6%	0%	0%	764	49	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	3	3%	100%	100%	3%	97%	0%	0%	24	789	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	4	0%	100%	100%	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0	0%	100%	0%	0%	0	813	0	0
	5	100%	100%	13%	100%	0%	0%	0%	903	0	0	0	100%	0%	0%	0%	903	0	0	0
	6	100%	56%	9%	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0
	7	57%	100%	58%	57%	43%	0%	0%	731	552	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1283	0	0
	8	59%	74%	100%	59%	41%	0%	0%	757	526	0	0	0%	0%	100%	0%	0	0	1283	0
	9	100%	71%	58%	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1283	0	0	0
	10	100%	65%	9%	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1329	0	0	0
	11	1%	37%	61%	1%	37%	61%	1%	23	858	1415	23	1%	37%	61%	1%	23	858	1415	23
	12	100%	71%	100%	100%	0%	0%	0%	1219	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1219	0	0	0
	13	100%	100%	11%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	14	100%	90%	65%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	15	61%	77%	100%	61%	39%	0%	0%	709	453	0	0	0%	0%	100%	0%	0	0	1162	0
	16	7%	82%	59%	7%	82%	11%	0%	83	975	131	0	0%	82%	18%	0%	0	975	214	0
	17	0%	73%	10%	0%	73%	10%	17%	0	868	119	202	0%	73%	10%	17%	0	868	119	202
	18	100%	69%	11%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	19	2%	100%	11%	2%	98%	0%	0%	23	1139	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1162	0	0
	20	100%	69%	65%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	21	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	22	100%	90%	11%	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1162	0	0	0
	23	8%	90%	100%	8%	90%	2%	0%	93	1046	23	0	0%	0%	100%	0%	0	0	1162	0
	24	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1189	0	0	0

**Tabla 4.21. Resultados caso 4.**

En la Tabla 4.21 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 4.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
5	1	30%	100%	100%	30%	70%	0%	0%	86	200	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	2	0%	100%	99%	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	3	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0
	4	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0
	5	44%	100%	36%	44%	56%	0%	0%	684	871	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1555	0	0
	6	0%	32%	7%	0%	32%	7%	61%	0	1373	300	2618	0%	32%	7%	61%	0	1373	300	2618
	7	16%	100%	22%	16%	84%	0%	0%	698	3667	0	0	0%	100%	0%	0%	0	4365	0	0
	8	53%	20%	13%	53%	20%	13%	14%	2330	879	571	615	53%	20%	13%	14%	2330	879	571	615
	9	53%	100%	6%	53%	47%	0%	0%	2312	2050	0	0	0%	100%	0%	0%	0	4362	0	0
	10	2%	20%	22%	2%	20%	22%	56%	86	858	944	2403	2%	20%	22%	56%	86	858	944	2403
	11	100%	24%	1%	100%	0%	0%	0%	3165	0	0	0	100%	0%	0%	0%	3165	0	0	0
	12	100%	48%	46%	100%	0%	0%	0%	2060	0	0	0	100%	0%	0%	0%	2060	0	0	0
	13	100%	100%	49%	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0
	14	100%	46%	30%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	15	1%	45%	49%	1%	45%	49%	5%	19	872	950	97	1%	45%	49%	5%	19	872	950	97
	16	34%	100%	28%	34%	66%	0%	0%	688	1335	0	0	0%	100%	0%	0%	0	2023	0	0
	17	90%	100%	11%	90%	10%	0%	0%	2307	256	0	0	0%	100%	0%	0%	0	2563	0	0
	18	59%	85%	81%	59%	41%	0%	0%	682	474	0	0	0%	85%	15%	0%	0	982	173	0
	19	100%	65%	4%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	20	59%	85%	24%	59%	41%	0%	0%	682	474	0	0	15%	85%	0%	0%	173	982	0	0
	21	0%	100%	24%	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0
	22	2%	85%	24%	2%	85%	13%	0%	23	982	150	0	0%	85%	15%	0%	0	982	173	0
	23	100%	75%	24%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	24	52%	74%	43%	52%	48%	0%	0%	690	637	0	0	26%	74%	0%	0%	345	981	0	0

**Tabla 4.22. Resultados caso 5.**

En la Tabla 4.22 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 5.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
6	1	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0
	2	1%	100%	100%	1%	99%	0%	0%	3	282	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	3	1%	100%	16%	1%	99%	0%	0%	3	282	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	4	100%	100%	99%	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0
	5	100%	100%	3%	100%	0%	0%	0%	1555	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1555	0	0	0
	6	100%	20%	1%	100%	0%	0%	0%	4292	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4292	0	0	0
	7	1%	22%	13%	1%	22%	13%	64%	44	960	567	2794	1%	22%	13%	64%	44	960	567	2794
	8	100%	100%	1%	100%	0%	0%	0%	4396	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4396	0	0	0
	9	39%	100%	22%	39%	61%	0%	0%	1701	2661	0	0	0%	100%	0%	0%	0	4362	0	0
	10	40%	100%	7%	40%	60%	0%	0%	1717	2575	0	0	0%	100%	0%	0%	0	4292	0	0
	11	7%	24%	9%	7%	24%	9%	60%	222	760	285	1899	7%	24%	9%	60%	222	760	285	1899
	12	83%	100%	46%	83%	17%	0%	0%	1710	350	0	0	0%	100%	0%	0%	0	2060	0	0
	13	100%	51%	49%	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0
	14	90%	100%	50%	90%	10%	0%	0%	1706	190	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	15	100%	45%	49%	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0
	16	100%	37%	14%	100%	0%	0%	0%	2023	0	0	0	100%	0%	0%	0%	2023	0	0	0
	17	8%	34%	2%	8%	34%	2%	56%	205	872	51	1435	8%	34%	2%	56%	205	872	51	1435
	18	100%	75%	49%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	19	100%	65%	49%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	20	4%	85%	81%	4%	85%	11%	0%	46	982	127	0	0%	85%	15%	0%	0	982	173	0
	21	18%	85%	24%	18%	82%	0%	0%	208	948	0	0	0%	85%	15%	0%	0	982	173	0
	22	100%	100%	24%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	23	100%	75%	4%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	24	3%	74%	43%	3%	74%	23%	0%	40	981	305	0	0%	74%	26%	0%	0	981	345	0

**Tabla 4.23. Resultados caso 6.**

En la Tabla 4.23 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 6.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
7	1	30%	100%	99%	30%	70%	0%	0%	86	200	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	2	0%	100%	99%	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	3	0%	100%	16%	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	4	30%	100%	99%	30%	70%	0%	0%	86	200	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	5	44%	68%	3%	44%	56%	0%	0%	684	871	0	0	32%	68%	0%	0%	498	1057	0	0
	6	0%	100%	7%	0%	100%	0%	0%	0	4292	0	0	0%	100%	0%	0%	0	4292	0	0
	7	0%	24%	13%	0%	24%	13%	63%	0	1048	567	2750	0%	24%	13%	63%	0	1048	567	2750
	8	0%	32%	1%	0%	32%	1%	67%	0	1407	44	2945	0%	32%	1%	67%	0	1407	44	2945
	9	53%	32%	6%	53%	32%	6%	9%	2312	1396	262	393	53%	32%	6%	9%	2312	1396	262	393
	10	100%	100%	13%	100%	0%	0%	0%	4292	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4292	0	0	0
	11	22%	33%	30%	22%	33%	30%	15%	696	1044	950	475	22%	33%	30%	15%	696	1044	950	475
	12	0%	68%	2%	0%	68%	2%	30%	0	1401	41	618	0%	68%	2%	30%	0	1401	41	618
	13	0%	100%	15%	0%	100%	0%	0%	0	1938	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1938	0	0
	14	0%	74%	30%	0%	74%	26%	0%	0	1403	493	0	0%	74%	26%	0%	0	1403	493	0
	15	100%	90%	2%	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0
	16	4%	100%	28%	4%	96%	0%	0%	81	1942	0	0	0%	100%	0%	0%	0	2023	0	0
	17	90%	68%	37%	90%	10%	0%	0%	2307	256	0	0	90%	10%	0%	0%	2307	256	0	0
	18	59%	100%	49%	59%	41%	0%	0%	682	474	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0
	19	59%	100%	4%	59%	41%	0%	0%	682	474	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0
	20	100%	100%	24%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	21	0%	91%	4%	0%	91%	4%	5%	0	1052	46	58	0%	91%	4%	5%	0	1052	46	58
	22	0%	100%	49%	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0
	23	100%	100%	49%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	24	1%	100%	21%	1%	99%	0%	0%	13	1313	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1326	0	0

**Tabla 4.24. Resultados caso 7.**

En la Tabla 4.24 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 7.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
8	1	6%	100%	100%	6%	94%	0%	0%	17	268	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	2	6%	100%	41%	6%	94%	0%	0%	17	268	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	3	0%	100%	100%	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0	0%	100%	0%	0%	0	285	0	0
	4	100%	100%	41%	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0	100%	0%	0%	0%	285	0	0	0
	5	100%	63%	91%	100%	0%	0%	0%	1555	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1555	0	0	0
	6	0%	17%	16%	0%	17%	16%	67%	0	730	687	2876	0%	17%	16%	67%	0	730	687	2876
	7	0%	66%	3%	0%	66%	3%	31%	0	2881	131	1353	0%	66%	3%	31%	0	2881	131	1353
	8	53%	22%	32%	53%	22%	25%	0%	2330	967	1099	0	53%	15%	32%	0%	2330	659	1407	0
	9	0%	31%	3%	0%	31%	3%	66%	0	1352	131	2879	0%	31%	3%	66%	0	1352	131	2879
	10	2%	23%	3%	2%	23%	3%	72%	86	987	129	3090	2%	23%	3%	72%	86	987	129	3090
	11	3%	27%	74%	3%	27%	70%	0%	95	855	2216	0	0%	26%	74%	0%	0	823	2342	0
	12	1%	42%	34%	1%	42%	34%	23%	21	865	700	474	1%	42%	34%	23%	21	865	700	474
	13	35%	51%	100%	35%	51%	14%	0%	678	988	271	0	0%	0%	100%	0%	0	0	1938	0
	14	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	15	100%	100%	6%	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1938	0	0	0
	16	34%	100%	35%	34%	66%	0%	0%	688	1335	0	0	0%	100%	0%	0%	0	2023	0	0
	17	100%	34%	92%	100%	0%	0%	0%	2563	0	0	0	100%	0%	0%	0%	2563	0	0	0
	18	100%	75%	10%	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1156	0	0	0
	19	7%	85%	10%	7%	85%	8%	0%	81	982	92	0	5%	85%	10%	0%	58	982	116	0
	20	0%	75%	61%	0%	75%	25%	0%	0	867	289	0	0%	75%	25%	0%	0	867	289	0
	21	2%	100%	100%	2%	98%	0%	0%	23	1132	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0
	22	7%	75%	100%	7%	75%	18%	0%	81	867	208	0	0%	0%	100%	0%	0	0	1156	0
	23	0%	100%	61%	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1156	0	0
	24	100%	74%	53%	100%	0%	0%	0%	1326	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1326	0	0	0

**Tabla 4.25. Resultados caso 8.**

En la Tabla 4.25 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 8.



CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
9	1	1%	100%	30%	1%	99%	0%	0%	19	1877	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	2	1%	52%	2%	1%	52%	2%	45%	19	986	38	853	1%	52%	2%	45%	19	986	38	853
	3	100%	40%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	4	100%	46%	15%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	5	100%	25%	27%	100%	0%	0%	0%	3490	0	0	0	100%	0%	0%	0%	3490	0	0	0
	6	15%	16%	1%	15%	16%	1%	68%	699	745	47	3167	15%	16%	1%	68%	699	745	47	3167
	7	14%	18%	12%	14%	18%	12%	56%	665	855	570	2659	14%	18%	12%	56%	665	855	570	2659
	8	14%	20%	12%	14%	20%	12%	54%	670	957	574	2584	14%	20%	12%	54%	670	957	574	2584
	9	14%	16%	12%	14%	16%	12%	58%	664	759	569	2751	14%	16%	12%	58%	664	759	569	2751
	10	0%	21%	20%	0%	21%	20%	59%	0	978	931	2748	0%	21%	20%	59%	0	978	931	2748
	11	100%	16%	12%	100%	0%	0%	0%	4546	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4546	0	0	0
	12	15%	19%	20%	15%	19%	20%	46%	699	885	932	2143	15%	19%	20%	46%	699	885	932	2143
	13	2%	21%	6%	2%	21%	6%	71%	95	997	285	3370	2%	21%	6%	71%	95	997	285	3370
	14	2%	16%	12%	2%	16%	12%	70%	96	766	574	3350	2%	16%	12%	70%	96	766	574	3350
	15	0%	21%	1%	0%	21%	1%	78%	0	997	47	3702	0%	21%	1%	78%	0	997	47	3702
	16	2%	19%	1%	2%	19%	1%	78%	93	885	47	3634	2%	19%	1%	78%	93	885	47	3634
	17	100%	100%	1%	100%	0%	0%	0%	3547	0	0	0	100%	0%	0%	0%	3547	0	0	0
	18	36%	40%	15%	36%	40%	15%	9%	683	758	284	171	36%	40%	15%	9%	683	758	284	171
	19	100%	100%	15%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	20	36%	100%	50%	36%	64%	0%	0%	683	1213	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	21	5%	100%	50%	5%	95%	0%	0%	95	1801	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	22	5%	52%	50%	5%	52%	43%	0%	95	986	815	0	0%	52%	48%	0%	0	986	910	0
	23	36%	40%	2%	36%	40%	2%	22%	683	758	38	417	36%	40%	2%	22%	683	758	38	417
	24	0%	43%	14%	0%	43%	14%	43%	0	870	283	870	0%	43%	14%	43%	0	870	283	870

**Tabla 4.26. Resultados caso 9.**

En la Tabla 4.26 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 9.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
10	1	90%	52%	15%	90%	10%	0%	0%	1706	190	0	0	90%	10%	0%	0%	1706	190	0	0
	2	0%	46%	15%	0%	46%	15%	39%	0	872	284	739	0%	46%	15%	39%	0	872	284	739
	3	2%	40%	30%	2%	40%	30%	28%	38	758	569	531	2%	40%	30%	28%	38	758	569	531
	4	100%	46%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	5	100%	28%	8%	100%	0%	0%	0%	3490	0	0	0	100%	0%	0%	0%	3490	0	0	0
	6	0%	16%	1%	0%	16%	1%	83%	0	745	47	3866	0%	16%	1%	83%	0	745	47	3866
	7	1%	61%	6%	1%	61%	6%	32%	47	2896	285	1519	1%	61%	6%	32%	47	2896	285	1519
	8	4%	16%	1%	4%	16%	1%	79%	191	766	48	3780	4%	16%	1%	79%	191	766	48	3780
	9	100%	21%	12%	100%	0%	0%	0%	4743	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4743	0	0	0
	10	5%	21%	12%	5%	21%	12%	62%	233	978	559	2888	5%	21%	12%	62%	233	978	559	2888
	11	0%	19%	12%	0%	19%	12%	69%	0	864	545	3137	0%	19%	12%	69%	0	864	545	3137
	12	100%	19%	12%	100%	0%	0%	0%	4660	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4660	0	0	0
	13	36%	16%	6%	36%	16%	6%	42%	1709	759	285	1993	36%	16%	6%	42%	1709	759	285	1993
	14	36%	20%	12%	36%	20%	12%	32%	1723	957	574	1531	36%	20%	12%	32%	1723	957	574	1531
	15	5%	93%	1%	5%	93%	1%	1%	237	4414	47	47	5%	93%	1%	1%	237	4414	47	47
	16	1%	21%	6%	1%	21%	6%	72%	47	979	280	3355	1%	21%	6%	72%	47	979	280	3355
	17	0%	21%	8%	0%	21%	8%	71%	0	745	284	2518	0%	21%	8%	71%	0	745	284	2518
	18	100%	52%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	19	100%	46%	2%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	20	100%	100%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	21	0%	72%	30%	0%	72%	28%	0%	0	1365	531	0	0%	72%	28%	0%	0	1365	531	0
	22	11%	40%	30%	11%	40%	30%	19%	209	758	569	360	11%	40%	30%	19%	209	758	569	360
	23	100%	40%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	24	100%	100%	2%	100%	0%	0%	0%	2023	0	0	0	100%	0%	0%	0%	2023	0	0	0

**Tabla 4.27. Resultados caso 10.**

En la Tabla 4.27 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 10.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
11	1	1%	56%	30%	1%	56%	30%	13%	19	1062	569	246	1%	56%	30%	13%	19	1062	569	246
	2	100%	74%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	3	5%	74%	50%	5%	74%	21%	0%	95	1403	398	0	0%	74%	26%	0%	0	1403	493	0
	4	100%	100%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	5	66%	50%	1%	66%	34%	0%	0%	2303	1187	0	0	66%	34%	0%	0%	2303	1187	0	0
	6	100%	23%	12%	100%	0%	0%	0%	4658	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4658	0	0	0
	7	49%	37%	1%	49%	37%	1%	13%	2326	1757	47	617	49%	37%	1%	13%	2326	1757	47	617
	8	0%	60%	6%	0%	60%	6%	34%	0	2871	287	1627	0%	60%	6%	34%	0	2871	287	1627
	9	0%	30%	1%	0%	30%	1%	69%	0	1423	47	3273	0%	30%	1%	69%	0	1423	47	3273
	10	100%	100%	6%	100%	0%	0%	0%	4657	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4657	0	0	0
	11	0%	31%	12%	0%	31%	12%	57%	0	1409	545	2591	0%	31%	12%	57%	0	1409	545	2591
	12	15%	100%	20%	15%	85%	0%	0%	699	3961	0	0	0%	100%	0%	0%	0	4660	0	0
	13	2%	37%	12%	2%	37%	12%	49%	95	1756	570	2326	2%	37%	12%	49%	95	1756	570	2326
	14	0%	29%	20%	0%	29%	20%	51%	0	1388	957	2441	0%	29%	20%	51%	0	1388	957	2441
	15	100%	37%	1%	100%	0%	0%	0%	4746	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4746	0	0	0
	16	0%	23%	1%	0%	23%	1%	76%	0	1072	47	3541	0%	23%	1%	76%	0	1072	47	3541
	17	100%	30%	16%	100%	0%	0%	0%	3547	0	0	0	100%	0%	0%	0%	3547	0	0	0
	18	5%	100%	15%	5%	95%	0%	0%	95	1801	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	19	5%	100%	2%	5%	95%	0%	0%	95	1801	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	20	100%	56%	50%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	21	0%	92%	15%	0%	92%	8%	0%	0	1744	152	0	0%	92%	8%	0%	0	1744	152	0
	22	5%	56%	15%	5%	56%	15%	24%	95	1062	284	455	5%	56%	15%	24%	95	1062	284	455
	23	0%	92%	30%	0%	92%	8%	0%	0	1744	152	0	0%	92%	8%	0%	0	1744	152	0
	24	34%	52%	46%	34%	52%	14%	0%	688	1052	283	0	2%	52%	46%	0%	40	1052	931	0

**Tabla 4.28. Resultados caso 11.**

En la Tabla 4.28 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 11.

CASO	HORA	SATISFACCION			ESCENARIO DE GESTION															
					RENTABILIDAD								CONFIABILIDAD							
					GESTION				POTENCIA (KW)				GESTION				POTENCIA (KW)			
		SGE	SGF	SGC	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED	SGE	SGF	SGC	RED
12	1	100%	52%	6%	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0	100%	0%	0%	0%	1896	0	0	0
	2	0%	52%	37%	0%	52%	37%	11%	0	986	702	209	0%	52%	37%	11%	0	986	702	209
	3	5%	100%	37%	5%	95%	0%	0%	95	1801	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	4	0%	40%	37%	0%	40%	37%	23%	0	758	702	436	0%	40%	37%	23%	0	758	702	436
	5	2%	25%	67%	2%	25%	67%	6%	70	873	2338	209	2%	25%	67%	6%	70	873	2338	209
	6	2%	16%	3%	2%	16%	3%	79%	93	745	140	3679	2%	16%	3%	79%	93	745	140	3679
	7	14%	100%	2%	14%	86%	0%	0%	665	4083	0	0	0%	100%	0%	0%	0	4748	0	0
	8	100%	20%	49%	100%	0%	0%	0%	4785	0	0	0	100%	0%	0%	0%	4785	0	0	0
	9	2%	21%	30%	2%	21%	30%	47%	95	996	1423	2229	2%	21%	30%	47%	95	996	1423	2229
	10	0%	21%	15%	0%	21%	15%	64%	0	978	699	2981	0%	21%	15%	64%	0	978	699	2981
	11	15%	22%	52%	15%	22%	52%	11%	682	1000	2364	500	15%	22%	52%	11%	682	1000	2364	500
	12	2%	21%	50%	2%	21%	50%	27%	93	979	2330	1258	2%	21%	50%	27%	93	979	2330	1258
	13	0%	18%	30%	0%	18%	30%	52%	0	854	1424	2468	0%	18%	30%	52%	0	854	1424	2468
	14	14%	18%	49%	14%	18%	49%	19%	670	861	2345	909	14%	18%	49%	19%	670	861	2345	909
	15	2%	16%	30%	2%	16%	30%	52%	95	759	1424	2468	2%	16%	30%	52%	95	759	1424	2468
	16	0%	21%	50%	0%	21%	50%	29%	0	979	2330	1351	0%	21%	50%	29%	0	979	2330	1351
	17	1%	28%	40%	1%	28%	40%	31%	35	993	1419	1100	1%	28%	40%	31%	35	993	1419	1100
	18	0%	52%	37%	0%	52%	37%	11%	0	986	702	209	0%	52%	37%	11%	0	986	702	209
	19	0%	46%	100%	0%	46%	54%	0%	0	872	1024	0	0%	0%	100%	0%	0	0	1896	0
	20	1%	100%	74%	1%	99%	0%	0%	19	1877	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	21	1%	40%	100%	1%	40%	59%	0%	19	758	1119	0	0%	0%	100%	0%	0	0	1896	0
	22	36%	40%	74%	36%	40%	24%	0%	683	758	455	0	0%	26%	74%	0%	0	493	1403	0
	23	36%	100%	100%	36%	64%	0%	0%	683	1213	0	0	0%	100%	0%	0%	0	1896	0	0
	24	0%	37%	70%	0%	37%	63%	0%	0	749	1275	0	0%	30%	70%	0%	0	607	1416	0

**Tabla 4.29. Resultados caso 12.**

En la Tabla 4.29 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del GLD para el caso 12.

---

# 5

## CONCLUSIONES

---

Una vez implementado el modelo de un sistema de generación de energía eléctrica híbrido basado en tres fuentes alternativas limpias e implementar un sistema capaz de gestionar de distintas formas la energía producida por dichas fuentes, al analizar los resultados obtenidos y realizando la respectiva comparación de estos, es posible concluir en esta investigación lo siguiente:

- Un sistema de generación de energía eléctrica basado en fuentes alternativas, aumenta su confiabilidad si está conformado por más de un recurso, dado que en múltiples casos, a pesar que un solo sistema esté diseñado para cumplir con la demanda eléctrica, es posible que las condiciones de trabajo no le sean favorables. Al incrementar el número de fuentes alternativas de las cuales se surte el sistema, se contribuye con el aumento de la potencia total que puede suministrar el sistema y de igual forma con la posibilidad que una o más sean capaces de satisfacer la demanda específica trabajando de forma individual o colectiva, según la gestión de la energía generada por cada una. Desde este punto de vista se puede concluir que el GLD incrementará su flexibilidad y confiabilidad conforme incrementa el número

de fuentes bajo su gestión, siendo posible explorar variados escenarios de gestión. Esto se evidencia en el Capítulo 4 donde se evaluó la respuesta del GLD bajo distintas disponibilidades de los subsistemas.

- La gestión de energía mediante técnicas de inteligencia computacional, en este caso lógica difusa, resulta muy conveniente dada la naturaleza difusa de las variables que gobiernan la generación de energía eléctrica mediante fuentes alternativas, mostrando con ello la utilidad de dicho sistema para este tipo de escenario, ya que es posible el predecir y discernir cuál o cuáles fuentes son las más aptas para cubrir una demanda eléctrica en un momento determinado bajo circunstancias específicas. Esta forma de gestión incrementa la eficiencia del sistema dado que de esta forma es posible seleccionar cada subsistema según sea conveniente, observando costos, confiabilidad y prioridad.
- La gestión inteligente de la energía eléctrica proveniente de los sistemas basados en fuentes alternativas empleados en este trabajo, incide en una disminución considerable del uso de la red eléctrica convencional, la cual emplea en muchos casos, fuentes contaminantes, no alternativas o con alto impacto negativo en el medio ambiente. Esto se evidencia en el hecho de que la gestión inteligente aporta un mayor grado de eficiencia, siendo posible gestionar la energía disponible de una mejor manera.
- Los escenarios de gestión por rentabilidad y confiabilidad arrojan resultados similares siempre y cuando se cumpla que la fuente más rentable es también la más confiable, teniendo en cuenta las delimitaciones de la investigación, en la que se determinó que el subsistema eólico es el que conlleva un menor costo, se puede inferir que estas curvas de respuestas, para ambos escenarios, serán idénticas cuando el orden de confiabilidad sea primero SGE, segundo SGF y tercero SGC.
- Dado que la potencia disponible del SGC es función del flujo de hidrógeno, lo convierte en el sistema más confiable de los tres propuestos en este trabajo, como se evidencia en los resultados discutidos en el Capítulo 4 donde se observa que la

potencia disponible del SGC tiende a estar en su valor nominal, mientras que en el SGE y SGF oscilan en mayor grado sobre su valor nominal, debido a que es posible el controlar el flujo de hidrógeno más resulta complicado si no imposible el controlar el viento o la irradiación. Es por ello que el SGC brinda al sistema híbrido una garantía desde el punto de vista de confiabilidad. Sin embargo, desde el punto de vista de la rentabilidad su materia prima resulta ser la más costosa de las propuestas.

---

# 6

## TRABAJO FUTURO

---

En esta investigación se enfatizó sobre la gestión de fuentes de energía alternativas como la eólica, la fotovoltaica y la de celda de combustible, los modelos de estos sistemas fueron tomados del estado del arte y por ende corresponden a sistemas genéricos, que para el caso particular de evaluación y validación del comportamiento del gestor difuso propuesto en este trabajo resultaron muy útiles y convenientes. Sin embargo es posible el realizar modelos puntuales sobre sistemas y diseños comerciales de este tipo o de otras formas de energía renovable a fin de enriquecer aún más el trabajo realizado hasta aquí, trasladando el estudio realizado al terreno de la implementación física de tal sistema. Para ello, ha de ser necesario el realizar cálculos sobre el costo computacional que demandaría el sistema propuesto en esta investigación a fin de conocer la viabilidad de un sistema de este tipo funcionando en tiempo real, esto podría realizarse, por ejemplo, empleando hardware de alto desempeño y procesamiento paralelo. También es posible el realizar comparaciones del sistema versus otras formas de gestión inteligente que podrían emplear diferentes técnicas de inteligencia computacional como pueden ser las redes neuronales o los sistemas neuro-difusos. Otro estudio posible que puede derivarse de este trabajo es el



análisis de mercado para el tipo de gestión por rentabilidad, pues ya que el objetivo de esta investigación se centraba en el estudio de la gestión de energía por medio de lógica difusa, se presentó de forma predeterminada un orden de prioridad para esta gestión. En este sentido, lo que se propone es tener en cuenta la bolsa de valores para que el sistema pueda tener la cotización de la oferta de energía de cada sistema, incluyendo la red, para de esta forma gestionar por criterio de rentabilidad y entregar una decisión acorde con la oferta energética en un momento determinado. En este mismo contexto es posible el proponer otros escenarios de gestión como por ejemplo por tiempo, por secuencia o por menor impacto ambiental, para de esta forma obtener más puntos de referencia para la evaluación del gestor.

Desde el punto de vista del sistema implementado, el gestor difuso fue diseñado bajo ciertos parámetros de entradas, salidas y resoluciones de las mismas, como un estudio referido al presente puede surgir el análisis comparativo de distintos gestores difusos que manejen parámetros diferentes.

En cuanto al cálculo o ponderado de la curva de demanda, es posible el ubicar más descriptores de los que contempla este trabajo a fin de mejorar la precisión con la que esta curva predice la demanda en el periodo establecido. También es posible el emplear otras técnicas de inteligencia computacional para determinar dicha curva.

Si se orienta la investigación hacia el plano del medio ambiente, que es una de los frentes sobre el cual se fundamentó este trabajo, resultaría muy conveniente el estudio del impacto que tendría el sistema sobre el medio ambiente y evaluar en qué porcentaje se reducirían las emisiones de efecto invernadero versus la energía generada, con lo que sería posible el evaluar la viabilidad de este tipo de sistemas.

# REFERENCIAS

- [1] Varela, S. (2009).ER-INNOVA. <http://erenovable.com/2009/10/21/galicia-y-portugal-unidos-por-energias-renovables>.
- [2] Barta, P. (2010) BIODISOL, <http://www.biodisol.com/biocombustibles/el-problema-economico-de-la-energia-alternativa>.
- [3] Rey, D. (2008) Energías Renovables y sostenibilidad Energética, <http://www.eryse.com/2008/05/24/%C2%BFson-las-energias-renovables-la-solucion-al-problema-energetico>.
- [4] Craddock, D. (2008). Renewable energy made easy: free energy from solar, wind, hydropower, and other alternative energy sources. Capítulos 1-7. Atlantic publishing. Florida, EU.
- [5] Hashem, M. (2009) Modeling and control of fuel cells: distributed generation applications. Capítulo 2 y 3, IEEE press. Canada.
- [6] D. J. Hall and R. G. Colclaser, "Transient modeling and simulation of tubular solid oxide fuel cells," *IEEE Trans. Energy Conv.*
- [7] Villarrubia, M. (2004). Energía Eólica. Capítulos 2, 3 y 4. Editorial CEAC, Universidad de Barcelona, España.
- [8] Romero, M. (2010). Energía Solar Fotovoltaica. Capítulo 3. Editorial CEAC. Universidad de Barcelona, España.

- [9] Mallo, C. (2000) Predicción de la demanda eléctrica horaria mediante redes neuronales artificiales. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad de Oviedo. España.
- [10] Pino, R. Gómez, A. De abajo, N. (2001). Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva. Capítulo 2, Universidad de Oviedo, España.
- [11] Lagunas, J. (2004). Control supervisório difuso para un sistema de generación eléctrica. CENIDED, Cuernavaca, México.
- [12] Zúñiga, R. (2000). ECOTECNIA extiende sus aspas hasta Japón <http://www.ucm.es/BUCM/be/prensa/2000/03/19/articulos/12>.
- [13] Britton, K. (2010). Acquisition Enhances GE Global Smart Grid Software Solutions General Electric, [http://www.gepower.com/about/press/en/2010\\_press/080210.htm](http://www.gepower.com/about/press/en/2010_press/080210.htm).
- [14] Escudero, J. (2008). Manual de energía eólica. Capítulo 5. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- [15] Méndez, J. Cuervo, R. (2007). Energía solar fotovoltaica. Capítulos 2 y 5. FC editorial. Madrid, España.
- [16] Enríquez, H. (2004). Diseño de sistemas eléctricos. Capítulo 5. Editorial Limusa. México D.F.
- [17] Huld, T. Suri, M. (2007). PVGIS Solar Irradiation Data. European Communities. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php>.
- [18] Oñate, D. (2006). Diseño de una instalación Solar Fotovoltaica. ISOFOTON.

- [19] Spiegel, C. (2008). PEM fuel cell modeling and simulation using Matlab. Capítulos 2-14. Academic press. San Diego. EU.
- [20] Lambert, T. Gilman, P. Lilienthal, P. (2006). Integration of Alternative Sources of Energy. HOMER ENERGY, <http://www.homerenergy.com/>.
- [21] M. Eskander, T. El-Shatter, M. El-Hagry. (2002) Energy Flow And Management of A Hybrid Wind/PV/ Fuel Cell Generation System. Electronics Research Institute.
- [22] H. Muller, A. Rudolf, G. Aumayr. (2001) Studies of distributed energy supply systems using an innovative energy management system. Department of Electric Power Systems Vienna University of Technology Vienna, Austria.
- [23] W. Schellong. (2006). Integrated energy management in distributed systems. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.
- [24] D. Cameiro, J. Pinto, R. Godoy, A. Pinto, A. Carniato. (2009) Modeling And Simulation Of A Supervision And Management System Of Hybrid Energy Systems For The Pantanal Region. Federal University of Mato Grosso do Sul.
- [25] A. Ferreira, J. Anteonor, G. Spiazzi, L. De Araujo. (2008). Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System. IEEE transactions on power electronics.
- [26] V. Courtecuisse, B. Robyns, M. Petit, B. Francois, J. Deuse. (2008) Performance comparison of different wind generator based hybrid systems. 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008).
- [27] Zhou, T. Li, P. Francois, B. (2004) Management Strategies of a DC-Coupled Hybrid Power System in a Microgrid for Decentralized Generation. Ecole Centrale de Lille, Francia.

[28] Srinivasan, S. (2006) Fuel Cells from fundamentals to applications. Parte 2, capítulo 4. Editorial Springer. Berlin Heidelberg, Alemania.

[29] Hau, E. (2006) Winds Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Capítulos 3 y 4. Editorial Springer. Berlin Heidelberg, Alemania.

[30] Jutglar, Ll. (2004) Energía Solar. Capítulo 5, Universidad de Barcelona, España.

[31]<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/arauca/87061/figuras/Figura%20125.GIF>

[32][http://cp.home.agilent.com/upload/cmc\\_upload/ck/SP/images/Fuel-cell-350x240.jpg](http://cp.home.agilent.com/upload/cmc_upload/ck/SP/images/Fuel-cell-350x240.jpg)

[33]<http://www.renovables-energia.com/wp-content/uploads/2009/05/esquema-aerogenerador.jpg>

[34]<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/img/fig22.gif>

[35] <http://www.anpasol-energiasolar.com/images/SistemaAislado.jpg>

[36] [http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id\\_articulo=712](http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=712)